المنظمة العربية للترجمة

تِدْ سرجنت

رقص الجزيئات

كيف تغير التكنولوجيا النانوية من حياتنا

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي

TARANA

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

لجنة التقنيات والعلوم التطبيقية

محمد مراياتي (منسقاً)
هاني رزق
بسام معصراني
حسن الشريف
سميع البنا
إبراهيم الحاج

المنظمة العربية للترجمة

تِدْ سرجنت

رقص الجزيئات

كيف تغير التكنولوجيا النانوية من حياتنا

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي

مراجعة

د. حيدر حاج إسماعيل

الفهرسة أثناء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة
سرجنت، تِدْ
رقص الجزيئات: كيف تغير التكنولوجيا النانوية من حياتنا/ تِدْ سرجنت؛ ترجمة صباح صدّيق الدملوجي؛ مراجعة حيدر حاج إسماعيل.
296 ص. - (تقنيات وعلوم تطبيقية)
بيبليوغرافيا: ص 285 - 292.
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-1364-0
1. الجزيئات. 2. التكنولوجيا الحيوية. أ. العنوان. ب. الدملوجي، صباح صدّيق (مترجم). ج. حاج إسماعيل، حيدر (مراجع). د. السلسلة.
620.5

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

المنظمة العربية للترجمة
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 - 113
الحمراء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 - 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 - 113
الحمراء - بيروت 2407 2034 - لبنان
تلفون: 750084 - 750085 - 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» - بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، كانون الأول (ديسمبر) 2008

إلى ذكرى أجدادي:
كرماء وشغوفين وملهمين وحكماء

.

إلى ابنة أختي كلارا ليندر
وهي حافلة بالأمل وبشائر النجاح
ومتانة الأخلاق والمستقبل الواعد

المحتويات

الصحة

البيئة

المعلومات

مــــدخـــل

تــخــيُّــلات

لم أكن قد تجاوزت السابعة عشرة في السنة التي توفيت فيها غريتا غاربو (Greta Garbo) في نيويورك بسبب الفشل الكلوي، في هذه السنة كنت قد عقدت العزم على أن أتخصص في مجال النانوتكنولوجيا. كنت هيماناً بغريتا غاربو، وبمشاهدتي فيلمها **ماتا هاري** (*Mata Hari*)، غدوت مسلوب الإرادة وأكثر تكريساً وثقةً من أي ملازم روسي واقع في المصيدة.

كنت أفكر وأنا مسحور بتمايل وركيها: هل علي القناعة بالحلم بها وحسب؟

كنا نعرف ما فيه الكفاية عن المادة (Matter)، ونعرف أكثر من ذلك عن غريتا، فلماذا يكون تخيُّل إعادتها إلى الحياة أمراً سخيفاً؟ لن يكون ذلك باستنساخها حيوياً، بل ببنائها. قُمْ بتركيبها وبنائها، وأعطها الروح بدءاً بالذرة فما بعد، ثم قُمْ بمزج العناصر محوِّلاً الشكل الكيميائي إلى هيئة إنسانية.

كانت المكونات اللازمة موجودة تحت تصرفي، وكان لدينا منظور مرئي كامل لغريتا يصف تفاصيل بنيتها، أي معماريتها وتأثيثها، إذ تقوم بقايا ضئيلة من أوكسيد الفضة بإمرار أو حجب الضوء معيدة رواية نتوءات هيئتها. أما صوتها فكان صداه يتردد في ذاكرتي، ولا بد أن الحضور الذهني لدى ليونيل باريمور (Lionel Barrymore) كان قد سجّل رائحة شعرها وهو يتهادى تحت أنفه. إن خطوطها الأولية (Blueprints) يجب أن تكون مهيّئة لنقلها: سأستطيع إضافة شفتي إلى خدها.

إن غريتا تعيش في المادة كما تعيش في الذاكرة، وإن جُزَيْئاتها مازالت تحيط بنا بعد خمسة عشرة عاماً من وفاتها، أما عنصر الـ «غاربونيوم» (Garbonium)، فينطلق في نسمات الهواء التي نتنفسها. كانت جزيئات غريتا في ما مضى منتظمة في بنية فوقية بشكل معقد ومنسقه بصورة رائعة، فالبروتينات المصنعة من المخططات الأولية لـ «دي. أن. آي.»(*) (DNA) اللذيذ لها وضعت العضلة والسمنة والكبد في مواضعها الباهرة، وزوّد الأوكسيجين والكلوكوز دمها الساخن القاني بالغذاء، معطياً غريتا الطاقة والحياة... والفتنة.

لا، إن غريتا لم تختفِ. ما حصل هو أن ذرّاتها كانت في الأماكن المخطوءة وحسب، منشورة حول العالم، لكنها مازالت هناك في العالم المادي. وقد أردتُ لغريتا أن تعود متكاملة. كانت كافة مواهبها الحسية محفوظة، وكانت العناصر نفسها التي وهبتها

[إن الهوامش المشار إليها بأرقام تسلسلية هي من أصل الكتاب. أما تلك المشار إليها بـ (*) فهي من وضع المترجم].

(*) الـ دي. أن. آي. (DNA): المختصر الذي يستعمله البيولوجيون المختصون للإشارة إلى «الحمض النووي الريبي المنقوص الأوكسيجين»، المسمّى بالإنجليزية Deoxyribonucleic Acid «الديوكسيريبونيوكليك أسيد»، وهو حمض موجود في نواة الخلية الحية.

الحياة عندما كانت مرتبة بطريقة مناسبة معلقةً في الهواء. إذاً، لماذا لا أستطيع الرقص مع غريتا غاربو الآن؟

ربما تكون الكائنات الحية أكثر الأمثلة اللافتة للنظر عن قوة الذرات عندما تكون منظمة بطريقة مناسبة لكي تقدم مجموعة مدهشة من السلوكيات، لكن ذلك لا يقتصر على الكائنات الحية، فكتل الزجاج تعكس وتكسر الضوء، واللدائن (البلاستيك) تلتوي، بينما تعطى هياكل الدراجات من التيتانيوم الصلادة. أما ملفات الشعر والصلب، فمهمتها إعطاء الدعم، في حين أن أشباه الموصلات (Semiconductors) تنقل أمواج الإلكترونيات في تناغم منسجم. ما الذي سيحدث فيما لو استطعنا أن ننتقي ميزة ما ـ مقاومة الرصاص أو القضاء على خلايا السرطان، ثم نحدد ونولد الجزيئات ومنها المواد المطلوبة لتحقيق أحلامنا؟

قد يبغي البعض إنقاذ الأرواح مستخدمين هذه القوة المدهشة:

ابتداع أداة متكاملة مع مجرى دم المصاب بداء السكري لتقوم بمراقبة مستويات السكر في الدم بصورة تامة، والحفاظ على تلك المستويات كما هي في الشخص السليم، أو أخرى تقوم بالكشف المستمر عن التغييرات الإحيائية الخطيرة والتخلص منها، أو ثالثة تزيل الملوثات من هواء مدننا . . . إلخ.

وقد يحلم آخرون بإنهاء الحياة عبر:

ابتداعٍ رصاصات من نوع جديد ذات صلابة عظيمة وشكل انسيابي يمكّنانا من اختراق الصدريات المقاومة للرصاص في أيامنا، أو بناء طائرات من دون طيار ذات حجم فائق الصغر مرصوصة بمتفجرات ذات كثافة عالية لقصف المباني، أو هندسة نوع من الفيروسات لا تقتل إلاّ ذوي العيون الزرق.

وقد يتخيل آخرون طرقاً لتحسين نوعية الحياة:

بابتداع بذلة عضلية مصدر قوتها الهيدروجين تقوم بتضخيم القوة والدهاء، أو أن يصبغوا غرفة بطريقة تعرض فيها جدرانُها في ذات اللحظة خيالات حيّة لمكان آخر بعيد عبر المحيطات، دامجة بذلك بيئتين تفصلهما آلاف الأميال سمعياً وبصرياً بحيث لا تعود هناك حاجة لسفرات طويلة مكلفة وملوثة.

وقد يحلم آخرون بتحسين حياتهم على حساب حياة أناس آخرين، وذلك:

بابتداع أدواتِ تَتَبُّع لاسلكيةٍ ومايكروفونات وآلات تصوير بحجم ذرة التراب، ليطلقوا هذه «البودرة» غير المرئية على ضحاياهم الغافلين، في ما يدعى بالمطاردة الإلكترونية.

لنكتفِ إلى هنا من الخيال الجامح، ولنهبطْ ثانية إلى الأرض. هل يمكننا أن نحوِّل أحلامنا حول تكييف المادة حسب متطلباتنا إلى حقيقة؟ يبدو الأمر صعباً، وهو يتطلب منا أولاً أن نقوم بالقياس، أي أن نعلم: أيّاً من الخصائص نختبر؟ وما هي الأوضاع النسبية للذرات التي تمتلكها المادة؟ تحسَّسْ التوائية الشعر وشَخِّصِ الذرات والجزيئات والبنى العليا التي يتألف منها. علينا بعد ذلك أن نتفهم ونتابع بصورة كاملة العلاقة بين هيكلية بنية المادة ووظيفتها: كيف تجعل التوائيةُ الكولاجن (Collagen) الشعرَ سرحاً أو جعداً؟ ثم علينا بعدها أن نعكس القضية: إدراج طلب لشعر غير مجعد، بل أن يميل بمقداره 90 درجة إلى الجنوب الغربي بعد كل إنش طولي، ومن ثم تحديد الجزيئات التي تحقق هذا السحر. علينا في النهاية أن نصنع جزيئاتنا ونحثها على الالتواء بحسب الحاجة، وعليها أن تحقق

الشيء نفسه مرة بعد مرة، والأفضل أن نصممها بشكل لا تسمح معماريتُها معه لانزلاق بسيط بتخريب المنظر العام. ستلهمنا النظم البيولوجية هنا في كل منعطف، وفي كل لحظاتها ككيانات حية، مثل أي ورقة نبات أو قوقع حلزوني، وهي ليست منقوصة لكنها فريدة وحسب.

إننا اليوم نحلِّل أفضل مما نركِّب، وهذا هو صلب الموضوع، فالعلماء يقومون بتفكيك المادة إلى العناصر المكوِّنة لها، لكننا لسنا قادرين حتى الآن على التتبع الكامل للأواصر بين الجزيئات النانويّة (Nanoscopic) وبين الحقائق الكبيرة (Macroscopic) التي نلتقي بها يوماً بعد يوم. إننا نستطيع معرفة تفاصيل التركيب الكيميائي بصورة دقيقة، لكننا لا نستطيع أن ندرك بصورة كاملة كيفية ارتباط الوظيفة بالبنية، فاكتشاف توالي الجينوم البشري (Sequencing Human Genome) لم يشخِّص لنا بدقة الجين المسؤول عن إغراء غاربو، فالقامة والمزاج والجاذبية تبقى بدل ذلك موزعة عبر جزيئات مبهمة من الـ «دي. أن. آي.»، وتبقى الـ «غاربونيات» (نسبة إلى غاربو) حتى الآن شيئاً إنسانياً وليس علماً.

تدهشنا اليوم مخلوقات الطبيعة الرائعة، ولكن عندما يصل الأمر إلى تصميم ما نختلقه نحن، مستخدمين الكتل البنائية التي وفرتها الطبيعة، تصبح كلٌّ من أصابعنا إبهاماً. وحتى لو امتلكنا خطةَ ذرةٍ فذرةٍ لمعمارية غريتا الشهوانية الثلاثية الأبعاد، مع مسطرة نانويّة (تقيس النانو)، فسوف نبقى عاجزين عن إعادة بنائها، لأننا غير قادرين على الاستيضاح الكامل أو بناء الأوامر بين القاعدة (أي ترتيب الذرات التي تشكل المادة) والقمة (أي التعقيد والبراعة والوظيفة واختلال الوظيفة)، فالواقع ـ على المقياس الكبير كما نعيشه اليوم ـ يشقّ طريقة بغموض خارجاً عن الشكل النانوي.

وهنا تدخل التكنولوجيا النانوية في المشهد، إذ يضع التقنيون النانويون أمامهم هدفاً هو تصميم وبناء مادةٍ حسب الطلب، حددتها متطلبات وظيفية، فالتكنولوجيا النانوية هي حركة منسقة وحركات راقصة مسبقة التصميم بين الذرات والجزيئات لإنجاز التأثير المطلوب.

وهي تتناغم ضمن مجموعة قواعد الطبيعة لتقتنع المادة كي تتجمع في هيئات جديدة. وتبدي المواد الناتجة عن ذلك جمالاً ملفتاً للنظر عندما ينظر إليها في مجهر إلكتروني أو ضوئي وفي العديد من الحالات حتى بالعين المجردة. والغرض منها الحصول على اختراقات في الطب والطاقة والمعلوماتية.

والتكنولوجيا النانوية ليست علماً جديداً، فقد قامت الطبيعة ومنذ أربع مليارات سنة بتنظيم الذرات في جزيئات بسيطة، والجزيئات في بروتينات، والبروتينات والسكّريات والشحوم في مجموعات معقدة من الخلايا في الحياة التي تحيط بنا. وتستخدم الطبيعة عدداً محدوداً من العناصر الذرية في عملية البناء، وهي تلك التي في الجدول الدوري. والطبيعة منضبطة بطريقة صارمة محددة نفسها ضمن مجموعة صغيرة من القواعد البسيطة إنما شديدة القوة، فالفيزياء ـ كما كان بول إيهرنفيست (Paul Ehrenfest) وهو أحد روّاد ميكانيكا الكمّ يقول ـ بسيطة إنما بارعة، فالطبيعة تقوم من خلال مجموعة متواضعة من العناصر التي تستخدمها بموجب قواعد صارمة باختراع تنوع وجمال وهيئة وأغراض لا نهاية لها.

وكان العلماء ولقرون مضت يستغلون خط تجميع الجزيئات الذي وفرته الطبيعة، فقد قمنا بربط الجزيئات لتشكيل سلاسل طويلة مثالية من البوليمرات (Polymer) ذات خواص يمكن التنبؤ بها،

وبذلك أوجدنا اللدائن والمطاط الصناعي، وقمنا بإدخال كتل من مواد غير نقية وغير متكاملة في حجرات مفرغة من الهواء، وتركنا الذرات تتبخر لنقوم بإنماء بلورات مدهشة التكامل ذات أشكال وأحجام واتجاهات محددة من تلك الكتل، وقمنا بالتحكم في كيفية قيام هذه المواد المصممة بإنتاج الضوء ونقل الكهرباء والاستجابة للمس.

والتكنولوجيا النانوية هي موضع تقاطع، أو موضع تجمع للتيارات المتدفقة في قلب العلوم المعاصرة، وهي حيث تندمج آخر الاختراقات في الكيمياء والفيزياء والبيولوجيا وتختلط بالهندسة والطب لتنتج الرقاقات الإلكترونية والتشخيص والعلاج الذي لا يمكن لأخصائي منعزل لوحده أن يعطينا إياه. وينتج عن التكنولوجيا النانوية تفكير متقارب عندما يجتمع ممثلون عن طرق تفكير مختلفة ويفهموا لغة أحدهم الآخر ويجمعوا الأفكار الناتجة عندما تصطدم النماذج.

وقد نمى التخصص كاستجابة ضرورية للتوسع السريع للعلوم خلال عصر النهضة، وتفرعت شجرة المعرفة إلى غصون منفصلة: الكيمياء والفيزياء والبيولوجيا، وتفرع كل غصن إلى فروع أصغر خلال السنين المئة المنصرمة: والكيمياء الحيوية (البيوكيمياء Biochemistry) تفرعت إلى: علم العقاقير (الفارماكولوجيا Pharmacology)، واكتشاف الأدوية، وعلم سُمِّيَّة الدواء (فارماكوتوكسيسيتي Pharmacotoxicity). إن ثقافة البحث العلمي في المجتمعات العلمية والهندسية والطبيعة تخضع اليوم إلى نهضة جديدة، فالباحثون في الفروع الثانوية لشجرة المعرفة قد أدركوا أنهم جميعاً مرتبطون، و«يتغذّون»، من جذع واحد: والمهندسون الميكانيكيون يستخدمون مجسات ذات حجم نانوي ليجرّوا البروتينات

التي يستحضرها الكيميائيون الحيويون لدراسة خواصها التوترية المدهشة، ويعمل المهندسون الكهربائيون مع البيولوجيين لإنماء خلايا وليس فقط دوائر كهربائية على رقاقة سليكونية، ويتعلم منظِّرو المعلوماتية المزيد عن حقل اختصاصهم من خلال مراقبتهم بوجل للأسرار المدهشة التي تكتشف المقدرة الفطرية التي يصلح بها الـ «دي. أن. آي.» الأخطاء التي تحدث أثناء استنساخه.

كان الباحثون في العلوم الصرفة يركزون يوماً ما بصورة ضيقة على البحث عن فهم الأشياء بأكثر الأشكال نقاء، إلاّ أنهم اليوم يفتخرون في تغيير أسلوب حياة الناس من خلال بحوثهم، وفي حين كان هذا الأمر يسلب العلم في ما مضى نقاءه، إلا أنه اليوم يجعله ذا صلة بالموضع شخصياً وبعمق كذلك. لم يعد الباحثون في مجالي الهندسة والطب ينتظرون نضوج الاختراقات العلمية وتفهمها بصورة كاملة بهيئة تكنولوجيات تخضع لتحكم متكامل، كي يبدأوا باستخدامها لابتداع وسائل علاجية أو تشخيصية أو وسائل اتصالات جديدة.

لو امتلكنا فهماً شاملاً لما يؤول إليه شكل جزيئي معطى خلال وظيفةٍ تمكن ملاحظتُها، فهل سيمكّننا ذلك من بناء موادَّ بالغةٍ حدَّ الكمال، إلى مواقع الذرات، بحيث تلبي متطلباتنا الإنشائية؟ وكان التقنيون النانويون في ما سبق منقسمين إلى معسكرين في ما يخص تقنياتهم لبناء المادة: «من القمة إلى الأسفل»، أو من القعر إلى الأعلى، فـ «القمة» تقع في ذروة هرم الوظائف: الغرض المفيد الذي أسبغته الخاصية الماكروسكوبية، أي الهدف المنشود. أما «القعر»، فيخص أصغر حجم مادي يمكن تصوره، أي عالم الذرات والجزيئات. وكلٌّ من تكنولوجيي «القمة إلى الأسفل» و«القعر إلى الأعلى» هم صانعو تنظيمات الذرات والجزيئات، لكنهم يستخدمون وسائل مختلفة.

برز تقنيو «من القمة إلى الأسفل» النانويون في حقل الهندسة الكهربائية، الذي قدم لنا نجاحات مدهشة في الإلكترونيات المايكروية في النصف الثاني للقرن العشرين، فقد كان المهندسون الكهربائيون يقومون بصورة منتظمة، وقبل أن نصل إلى النانومتر بفترة لا بأس بها، بشق طريقهم نزولاً، من «هدف» هو إنتاج آلة حاسبة سريعة وكفوءة فائقة البراعة، نحو تحديد المادة المطلوبة والتلاعب بها لإحداث أشكال من المعدن وأشباه الموصلات التي ما أن تتصل ببعضها حتى تشكل دوائر كهربائية مدمجة ذات مليار ترانزستور داخل حواسيبنا المحمولة. كانت رقاقات الحاسوب في الستينيات تُصنَّع باستخدام تقنية الليثوغرافيا (Lithograpghy) التي أتاحت لنا طبع أشكال لا تتجاوز 100 نانومتر، ويبلغ ذلك واحد في المئة من قطر الخلية وواحد بالألف من شعرة الإنسان وواحد بالألف مليون من السيلّيلويد المحيِّرة للفاتنة غريتا غاربو.

وقد برز من هذا التقليد المسبق التدبير لترتيب «من القمة إلى الأسفل» للمادة، أسلوبٌ مبكر لتناول التقنية النانوية. وكان الخوف عاملاً محفِّزاً في العملية: هل ستتوقف الماكنة الاقتصادية الهائلة القوة لتكنولوجيا المعلومات عندما يعجز المهندسون عن بناء دوائر كهربائية أصغر من أن تتمكن الأساليب الطباعية التقليدية من طبعه؟ كانت الاختراقات مطلوبةً للتحكم بنِتَف المادة التي يقل قطرها عن 100 نانومتر، رغم أنها تظل أكبر بكثير من الذرات والجزيئات المفردة. كان المطلوب من المهندسين تطوير إمكانية تصنيع المادة على المقياس النانوي.

وقد وضع الفيزيائي الحائز على جائزة نوبل للفيزياء سنة 1965، ريتشارد فينمان (Richard Feynman)، المعروف بحبه للتزلج على الماء وبمغامراته مع النساء، تفاصيلَ ما أصبح الحلمَ النهائي لمعسكر

«القمة إلى الأسفل». وقد أعطى اسمه إلى مجموعة من الأشكال الشبيهة بالحيامن (أي الحيوانات المَنَويّة) (Sperm-Like Diagrams) التي تقدم وصفاً للعلاقات التفاعلية الأساسية بين الجسيمات الأولية (Elementary Particles). ألقى فينمان سنة 1959 محاضرة في الاجتماع السنوي للجمعية الفيزيائية الأمريكية بعنوان **هناك مجال واسع في القعر** (*There is Plenty of Room at the Bottom*). وقد برهن فينمان من خلال قوانين الفيزياء والخواص المعروفة للمادة إمكانية تدوين كامل محتويات الأجزاء الأربع والعشرين لدائرة المعارف البريطانية على رأس دبوس.

بعد أربعة عقود من محاضرة فينمان، قام الباحثان في مختبر البحوث التابع لـ «آي بي أم» (IBM) في زوريخ، غريد بينيغ (Gred Binnig) وهاينريش روهرر (Heinrich Rohrer)، بكتابة كلمة I.B.M ذرةً فذرةً، مستخدمَيْن المجهر الإلكتروني الماسح الثاقب، وهو ما أهّلهما للفوز بجائزة نوبل للفيزياء سنة 1986. لو استمر هذان العالمان بالكتابة فقد كان بإمكانهما بسهولة إدراج محتويات دائرة المعارف البريطانية بكاملها على النهاية المدببة للدبوس وليس رأسه فحسب. هل كان ذلك هو المايكروبيديا أو الماكروبيديا؟ إنه النانوبيديا.

لكن هل سيوصلنا ترتيب الذرات العالي الدقة، الذاتي - الإدراك إلى موقع أقرب إلى غريتا غاربو؟ إن تنظيم 50 كيلوغراماً من ذرات الـ «غاربون» والأوكسيجين والنايتروجين للحصول على ذلك الشكل السويدي النظري المنمق مهمة هائلة، والرياضيات تروي لنا القصة:

(وزن غريتا غاربو 50 كيلو غراماً) ÷ (وزن ذرة الكاربون 2×10^{-23} غرام) = $2x10^{27}$ من الذرات الواجب ترتيبها.

هل نقوم بتجميع مليار مليار مليار ذرة؟

إن فريقاً يتألف من عشرين طالباً للدراسات العليا يعملون بكامل طاقتهم ـ سيأخذ كلّ من إيغور وسيرجي إحدى الساقين، وتونك وواه يتناولان اليدين -لن يتوقعوا إكمال المهمة خلال خمس سنوات من الإعداد لأطروحة الدكتوراه. إن كونها تستغرق أكثر بكثير مما أنا مستعد لانتظاره لا يشكل إلا جزءاً من المشكلة.

هل تثق بمهندس ليقوم بتصميم غريتا غاربو؟

عندما يقوم دافعو الذرات «من القمة إلى الأسفل» بتصميم الأدوات والدوائر والأنظمة الكهربائية، يصرّون على التحكم الدقيق بالقياس النانومتري لما سيقومون ببنائه. ويقوم مهندسو شركة إنتل (Intel) بارتداء ملابس صفراء بلون طيور الكناري من نوع بدلات رواد الفضاء، يعملون في أماكن للتصنيع فائقة النظافة، لمنع ذرة غبار واحدة من الترسب على رقاقة حاسوبك. وهناك تخطيط مركزي لكل نانوأيكر (Nanoacre) من المساحة النانوية، فإذا ما فشل ترانزستور واحد على الشبكة فإن آلتك الحاسوبية ستتوقف. لذا فإن السلطات تصر على الإتقان المطلق.

وفي تميز مخالف، تقوم الطبيعة ببناء أشياء غير متقنة لكنها ،تعمل بصورة متقنة، فكل ورقة في شجرة القيقب (Maple) فريدة في تركيبها الذري لكنها دون جدال واحدة من صنفها. لا عيوب في الطبيعة، إنما معجزات فقط. يريد الجيل الجديد من أخصائيي التكنولوجيا النانوية ومن خلال اندفاعهم أن يتعلموا من طريقة تنظيم المادة لذاتها وأن يستغلوا ذلك. وقد تكلم حائز جائزة نوبل جان ـ ماري ليهن (Jean-Marie Lehn) عن سوسيولوجية الجزيئات قائلاً: ما إن نتعرف على كيفية سلوك كل جزيئة (Molecule) وكيفية تفاعله مع «المواطنين» أقرانه، حتى نستطيع التنبؤ بـ «المجتمعات» التي ستشكلها هذه الجزيئات. ونستطيع من خلال معرفتنا بالقواعد التي

تخضع لها كل جزيئة التنبؤ بنشوء الهيكلية وبوظيفة المادة: «مجتمع» من الجزيئات ثم، في النهاية، ثقافة للمادة. عضلات قلبية تنبض. إسفنجيات جزيئية تصَفّي الملوِّثات. خلايا شمسية حاصدة للطاقة.

دعونا ننطلق في رحلة في عالم التكنولوجيا النانوية. دعونا نرا المدى الذي وصلناه في حث الطبيعة كي تشكل المادةَ حسب متطلباتنا، وفي استخدام تحكُّم مُتَقٍّ وصاقل للذرات والإلكترونات والبروتونات لتحسين الوجود الإنساني. دعونا ندرس كيف تُحدِث آخر الاختراقات ثورةً في صحة الإنسان وبيئته والمعلومات المتيسرة له. ودعونا، في وجه قصورنا أمام إنجازات الطبيعة حولنا، نستقص ونفكرْ ملياً بالمسؤوليات التي تواجه إمكانياتنا التي عثرنا عليها حديثاً.

مقدمة

الاكتشاف

يقوم التكنولوجيون النانويون، وقد ألهمتهم بيولوجيا الطبيعة ووفرت لهم الإرشاد والمساعدة، بتحويل المادي (Physical) إلى وظيفي (Functional)، مستخدمين الكيمياء كأداة لتحقيق ذلك. وتخدمنا خدمة جيدة اليوم القوانينُ التي عرفها السير إسحاق نيوتن قبل بضعة قرون بصورة جيدة في العالم المادي: فالقطارات «تتدحرج» على سككها، وتُفتح الأبواب مستندة على مفاصلها، ويتأرجح رقاص الساعة جيئة وذهاباً.

لقد وصف نيوتن فيزياء العالم المرئي، أو تجاربنا من يوم إلى آخر، وكذلك أعطانا منظوراً داخلياً في الضوء، وأرانا كيفية توجيه الصور باستخدام العدسات.

أما أولئك العلماء الذين صعدوا في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر على أكتاف نيوتن، فقد امتد بصرهم لمسافات أبعد، إذ فهموا ثم استطاعوا التحكم بتدفق الكهرباء. ومع نهاية ثمانينيات القرن التاسع عشر كان جايمس كليرك ماكسويل (James Clerk Maxwell)

قد وحد قوى الكهرباء والمغناطيسية وقام باللجوء إلى قوة الرياضيات باستنتاج الطريقة التي تنطلق فيها موجات الضوء خلال الفضاء والزمان.

ورغم كل ذلك فقد ظلت هناك أسئلة من دون إجابات:

ما الذي يتألف منه التيار الكهربائي الذي يتدفق في الدارات (Circuits)؟ هل كان مبنياً من جسيمات مثل ذرات ديموقريطس غير المرئية؟

ويمكن إثارة نفس السؤال عن الضوء:

إذا كان حركة موجيّة، فيمكن على وجه التأكيد تفكيكه إلى ذبذبات أكثر فأكثر عتمة، فهل هناك حدود للتخفيض مع الضوء أيضاً؟

اكتشاف قواعد لغة العالم النانوي

لقد تيسرت الإجابات عن هذه الأسئلة خلال السنين المئة المنصرمة، فقد اقترح ألبرت إينشتاين في سنة 1905 نظرية كمية للضوء لتفسير سلسلة من التجارب التي لم يدرك الآخرون كنهها، فقد افترض إينشتاين، بعد قياسات بسيطة لتدفق الكهرباء من معدن منوَّر بواسطة ألوان من مصباح، أن الضوء يأتي في رزم لا تتجزأ تعرف بالفوتونات (Photons).

في سنة 1927، ادَّعى فيرنر هايزنبرغ (Werner Heisenberg)، الذي كان من رواد ميكانيكا الكم (Quantum Mechanics)، بأن زيادة الدقة في تحديد موقع جسيمة مثل الإلكترون تقلل من الدقة في معرفة زخمها أو سرعتها. إن معرفة سرعة السيارة وموقعها في ذات الوقت هو جزء من عقيدة الفيزياء التقليدية. أما في فيزياء الكم،

وعندما تكون الجسيمات على القياس النانومتري موضوع البحث، فإن تلك الفكرة خاطئة.

علينا لكي نفهم ما قد يحدث من التجميع الذاتي والتنظيم الذاتي بين الجسيمات الأساسية، أن ننقب عن تلك المعلومات في الفصل المعنون «ميكانيكا الكم» في المجلد الذي يضم قواعد الطبيعة. سنفهم عند ذلك كيف تؤلف الطبيعة روائعها الملونة المختلفة مستخدمة أبجدية من الذرات تربط بينها أسس قواعدية لا استثناء فيها.

يُستنتج جزء كبير من ميكانيكا الكم من افتراض واحد بسيط لكنه مدهش: إن الإلكترونات ليست فقط جسيمات متميزة تحمل شحنة كهربائية، بل هي حركة موجيّة. والضوء الذي عُرِّف منذ فترة ليست بالقصيرة بأنه حركة موجيّة يتألف في الوقت ذاته من جسيمات: الفوتونات، وهي حزم ذات كمّ من الطاقة الضوئية. إن تعبير «ثنائية الموجة ـ الجسيمة» (Wave-Particle Duality) تصف هذه الصورة المتناقضة ظاهرياً، فالإلكترونات والفوتونات هي رزم من الأمواج قابلة للاحتساب.

وتعطي ميكانيكا الكم تكنولوجيي النانو مجموعة من القواعد ليتم استثمارها. وقد استفاد تكنولوجيو النانو فعلاً من هذه الإمكانيات، وأحد الأمثلة الملفتة للنظر في ذلك هو تأثير الكمّ الحجمي (Quantum Size Effect)، فمثلما يتم تحديد تردد ذبذبات وتر في الغيتار باعتماد طوله، ويتم التحكم في طبقة الصوت من خلال موضع الإصبع على الوتر، يتم كذلك تحديد مجموعة الترددات التي يمكن للإلكترونات أن تتذبذب بموجبها من خلال المسافة التي تُحصر ضمنها الموجات الإلكترونية. إن الطاقات الناجمة تشكل سلّماً من الترددات، مثلما هي الحال مع النغمات التوافقية

المحددة لوتر الغيتار، فالأوتار الطويلة تعطينا درجات متقاربة على السلم إلى حد يصعب معه التمييز بينها. أما في عالم الكمّ، فإن الحال ينصهر في فيزياء تقليدية مستمرة، وهذا يعطينا توضيحاً لقاعدة التوافق (Correspondence Principle)، وهي القاعدة التي تربط بين عالمي نيوتن وهايزنبرغ في الحدود الرمادية بينهما. أما للأوتار القصيرة ـ أو الإلكترونات المقيدة بصورة ضيقة، فإن درجات سلّم الطاقة تفصل في ما بينها مسافات جيدة، وهي محددة بوضوح، ولا يتمكن المرء من افتقاد طبيعة ميكانيكا الكمّ للإلكترونات.

وتوفر ميكانيكا الكمّ وسائل لتشكيل المادة، لأن تبديل حجم الجسيمة سيغير الطاقات التي ستتبناها الإلكترونات.

وتوفر ميكانيكا الكمّ وسائل لتشكيل المادة، لأن تبديل حجم الجسيمة سيغير الطاقات التي ستتبناها الإلكترونيات. وتحدد هذه الطاقات ألوان الضوء التي ستمتصها المادة والتي ستنبعث منها. إن تأثير الكمّ الحجمي سيغير المادة ذات اللون الواحد إلى مادة متعددة الألوان للمصمم. وقد كتب الشاعر بلْ بيسيت (Bill Bisset) في قطعة شعرية بعنوان **مؤامرة الطماطة لا تستحق شعراً كاملاً** (*The Tomatoe Conspiracy aint Worth a whol Pome*):

قليل من الناس
يدركون هذا رغم أن هناك خمسة أو ستة
مليارات من الناس يذهبون ويجيئون معتقدين
أن الطماطة حمراء وهي
في الحقيقة زرقاء لكنها قد رشت
بالأحمر ليجعلها تبدو
متحاشية مع معتقد الناس

إننا نستطيع من خلال تأثير الكمّ الحجمي أن نجعل المواد حسب ما نرغبه، وبدرجة تتجاوز توقعاتنا السابقة، فلكي تجد موزاً أزرق متناغم الحجم، استدر إلى اليمين عند شدة ورود الرزم مافوق البنفسجية المتألقة. وإذا ما وصلت إلى علبة تفاح مادون الحمراء الشهي، فإنك قد تجاوزت الحد.

إتقان أبجدية النانومتر

قد تبدو قواعد النانومتر غريبة، لكننا نفهمها اليوم جيداً، فتقنيو النانو يستطيعون اليوم تجميع أحرف وكلمات وجمل ومقاطع ذات معنى. إن انتصارنا النهائي سيتمثل في بناء قصص معقدة بدرجةٍ تُشابِه الحياةَ، مشيَّدةٍ من الأبجدية الذرية.

لدينا تحت تصرفنا ما يزيد قليلاً على 100 ذرة متميزة، تتألف كل منها من إلكترونات تدور حول نواة. بعض هذه الإلكترونات تشقّ لنفسها طريقاً في مساراتٍ ضيقةً تتشبت من خلالها بالنواة، بينما تتبع إلكترونات أخرى أقواساً أوسع. الإلكترونات الخارجية (The Outer Electrons) (التي تدور في القوس الأوسع) هي التي تتفاعل بقوة عندما تقترب الذرات من بعضها البعض، لذا فإن الذرات لا تعير تفاصيل نواها الداخلية إلا قليلاً من الاهتمام: إن نتيجة العلاقة بين الذرات في الكيمياء تحدّدها الطبقة الخارجية من إلكتروناتها.

سيتجاهل تقنيو النانو تفاصيل «الحياة» الداخلية للذرات، وسيشيرون بدل ذلك وبطريقة عرضية إلى كتلتها وشحنتها وتكافئها. وتثير مثل هذه الموضوعية صوراً نمطية وأحكاماً مسبقة «ذلك الكبريت، إنه لا يلتقي بذرة ذهب ما لم يلتصق بها». ورغم أن النوى ذات تفاصيل دقيقة إلا أنها بالنسبة للكيميائي ليست إلا لافتات تتنبأ بطبيعة العنصر وتنم عن ميوله: تعبير مجازي لنموذج أصيل.

تأليف الكلمات: بناء الجزيئات

كانت الطبيعة والكيميائيون، ومنذ قرون، يربطون الذرات ليؤلفوا موادَّ ذات خواص تختلف بصورةٍ لافتة للنظر عن مركَّباتها، فالصوديوم ـ مثلاً ـ عنصر يتفاعل بعنف مع الهواء، والكلور غاز قتال، لكن اتحادهما سوية بنسب متساوية، أي كلوريد الصوديوم، يشكّل مادة بيضاء بلورية مستقرة وضرورية للحياة. فجأة يكتسب أعضاء أبجديتنا المتواضعة عبر تعاونهم براعة وقوة، فعدد التوافقات الممكنة بين العناصر في الجدول الدوري (Periodic Table) هائل، والتنوع في قوتها وخواصها وافر. أما الاختلاف بينها، فيقارن بالاختلاف الموجود في العالم المملوء بالمواد الصلبة والسائلة والغازية والغرانيت والغرافيت والماس والخُبّاز (Hibiscus) والثور الأفريقي وكماءة الشتاء في جزيرة تسمانيا. ورغم أن ذلك يصعب تصديقه، إلا أن نبيذ بينو نوار (Pinot noir) ونبيذ باروسا شيراز (Barossa Shiraz) مركَّبين من نفس الأبجدية.

هل يمكن أن تكون التوافقات الممكنة، وبناء عليه الخواص المتاحة، أكثرَ حتى من الكمّ الهائل والمتنوّع الذي تمكنّا نحن والطبيعة من تركيبه؟ لم يكن هناك قبل شكسبير إلا أبجدية واحدة، كما هي الحال بعده، إلا أن شكسبير ترك وراءه حديقة إنجليزية خشنة ومتعددة الألوان ومبهجة للحواس، وهي حديقة استُنبتت من لاشيء غير أبجدية هذا العالم. علينا أن نقوم باستثمار قوتنا للتعبير مجدداً مستخدمين ستة وعشرين حرفاً، وكذلك أبجديتنا الذرية أيضاً، لم تُبْدِ أيَّ علامات على أن إمكانياتها الإبداعية استُنزفت. هذه هي المقدمة المنطقية لتقني النانو:

لاتزال هناك مجموعة كاملة ساحرة من المواد التي يجب أن تكتب مما لم تؤلفه الطبيعة.

إن هذا قد لا يكون صحيحاً إذا ما اقتصر عملنا على دمج عنصرين في كل مرة: الصوديوم والكلور للملح، الحديد والكاربون للصلب، ذرتي أوكسيجين لجزيئة الأوكسيجين في الهواء . . .

«أن تَصنَع يعني أنك موجود» (To Do is to Be): إن مدى الجمل المفيدة التي نقدر على بنائها باستخدام كلمتين محدود، أما الجزيئات فيمكن من ناحية أخرى بناؤها بأي عدد من الذرات: اثنتين في ملح الطعام، ثلاثٍ في الماء، وأربعة في بيروكسيد الهيدروجين (Hydrogen Peroxide). إن البروتينات في أجسامنا، كجزيئة الوراثة (الـ «دي. أن. آي. »)، مصنوعة من ملايين الذرات، لذا فإن الذرات تختلف بصورة هائلة من حيث الحجم، وبدرجة أكبر بكثير، من كلمات اللغة الإنجليزية. من نانومتر واحد إلى مئات النانومترات: من *Ja to donaudampfschiffahrtselekrizitaetenhauptbetriebswerkbau-unterbeamtengesellschaft*(*).

يَعرِف الكيميائيون أن ميل بعض الذرات والجزيئات للارتباط بعضها مع البعض وميل أخرى للتنافر لا نستطيع نحن أن نقرره، إنها قوانين الطبيعة، وهي تنتظر اكتشافنا الكامل لها، وتستدعي اختراعنا لتآلفات جديدة ضمن أطرها المثبتة. إنها مثل موسيقى الكاونتربوينت(**) (Counterpoint) لباخ: إنه لم يخترعها، كما أنه لم يعرّفها، هي فكرتنا عن الانسجام والتنافر. لقد قام مؤلف اللحن بالكشف عن استراتيجيات ضمن إطار شديد التحديد، وبتوفير ارتياح سمعي، وبرهن على أن إمكانيته على استثارة أنواع جديدة من

(*) يورد المؤلِّف هنا مثالاً من كلمات من اللغة الألمانية تتراوح بين كلمة Ja بمعنى نعم إلى كلمة ألمانية تتألف من نحو 79 حرفاً، وتعتبر أطول كلمة في اللغات الأوروبية.

(**) الكاونتربوينت: الموسيقى التي يمزج فيها أكثر من لحن واحد تتناغم في ما بينها معطية لحناً موسيقياً يعزف من قبل أوركسترا.

الاستجابات العاطفية لدى سامعيه كانت بلا حدود.

وإذا لم يكن بالإمكان تحقيق اتحادات ذرية غير تلك المحتومة، فسوف لن نستطيع أكثر من خلق الفرص: المساعدة في الإدخال، رفع درجة الحرارة، أو توكيد مداورة السلبي والإيجابي أو المُشرق والمعتم في صالة بيانو مخملية. إننا لا نستطيع أكثر من تحفيز القدر لكننا لا نستطيع تغيير المحتوم. ولن يكون هنالك ماكنات نانوية مجمّعة ذرة فذرة بالقوة. لكن الكيميائيين بدل ذلك، ولكي يعطوا مهنتهم هيئتها، قاموا ومنذ عهد طويل بدراسة ما تحبه وما تكرهه الذرات والجزيئات وقاموا بإحداث التزاوجات المقدَّرة بصورة كبيرة وحصدوا نسلها، فالكيميائيون لديهم القوة للجمع بين الشركاء المنسجمين الذين كانوا سيجدون شركاءهم بطريقة أخرى: إنهم يمزجون لحم الحمل مع صلصة النعناع، أو لحم البط مع البرتقال الذهني الصيني(*).

ابتداع الكلمات: معجم النانوتكنولوجيا المبكر

اكتشف تقنيو النانو المبكرون بعض الازدواجات المثيرة للاهتمام:

فقد أوصلت بعض الجزيئات المتميزة المكتشَفة في الثمانينيات، التقنيةَ النانويةَ إلى معجم ودائرة وعي المهندسين والعلماء. كانت الجسيمات النانوية الجديدة قد بنيت من أكثر الذرات وجوداً على الأرض، أي الكاربون، الذي يندس في تسعة من كل عشرة مركبات كيميائية نعرفها، ومن دونه لن يكون أقلام رصاص أو ماس، ولن يكون حسابات أو ماديات، وهو المادة الضرورية للحياة التي من دونها

(*) يتكلم المؤلف هنا عن بعض المطيبات التي تقدم مع أنواع المأكولات.

لن يكون لدينا «دي. أن. آي.» أو بروتينات أو سكريات أو دهون.

نوعان من الكاربون النقي المرتب كانا معروفين لنا منذ زمن بعيد: الماس والغرافيت. وتستمد كل مادة متانتها من ترتيب ذراتها ومن التفاعل بين هذه الذرات، فذرات الماس مرتبطة سوية بقوة بأبعاد ثلاثة، ما يُضفي صلابة من أي زاوية. أما الصفائح الذرية للغرافيت فهي صلبة منفردةً، لكنها تنزلق إحداها على الأخرى، ما يجعل المادة لينة مثل لب قلم الرصاص. إن التباين بين خواص مادتين تتألفان من نفس ذرات لا يميزها إلا طريقة ترتيبها، يعطينا مثلاً للأهمية الحاسمة لترتيب الذرات.

وأخذت مسلَّمة «ترتيب ذرات الكاربون»، التي احتفظت برزانتها حتى منتصف الثمانينيات، منحىً جديداً مع هارولد كروتو (Harold Kroto)، الأستاذ في جامعة ساسكس (Sussex) بإنجلترا، الذي كان له اهتمام بالكيمياء الداخلية لصنف من النجوم تدعى «العمالقة الحمر» (The Red Giants)، هي أبرد من شمسنا وتفوقها حجماً بعشرة إلى مئة مرة. أعتقد كروتو، بسبب الطريقة التي امتصت بها الضوء، أن هذه النجوم قد تكون محتوية على العديد من الجزيئات الغنية بالكاربون التي يهتم بها، وأراد أن يعرف كيف تشكلت تلك النجوم. بحث كروتو عن طريقة ليتمثل في المختبر حالات مشابهة لتلك الموجودة قرب نجوم الكاربون من العمالقة الحمر، ويقوم بعد ذلك بإنتاج جزيئاته على الأرض. واستدعاه ذلك إلى الاتصال بريتشارد إ. سمولي (Richard E. Smalley)، الذي كان يقوم بصورة روتينية في جامعة رايس (Rice) بتكساس باستحداث حالات مفرطة الشدة داخل حجرته الكيميائية، مثل توليد عناقيد أو تكتلات من الذرات أكبر من حجم الجزيئة الاعتيادية، وكان يستخدم اللايزر لتبخير مادة داخل حجرته محولاً إياها إلى غاز فعال من الذرات، ويقوم بعد ذاك بدراسة منتجات تفاعلاته.

سنة 1985، اجتمع كروتو وسمولي بروبرت كيرل (Robert Curl) مستخدمين جهاز سمولي لدراسة كيفية تشكيل عناقيد من الكاربون. كان كروتو يتوقع أن يرى إشارات إلى ما كان يحدث في البقع الساخنة من أجواء النجوم.

وقام طلاب الدراسات العليا جيم هيث (Jim Heath) وشين أوبراين (Sean O'brien) ويوان لين (Yuan Lin) بتبخير الكاربون، الذي تكثف في حجرتهم وشكلت ذراته المتبخرة عناقيد ذات حجم يتراوح بين عدة ذرات إلى عدة مئات من الذرات. وكان بالإمكان عندها تحليل هذه العناقيد، وأول تحليل كان لتحديد حجمها:

بعض الأحجام المعينة ـ ذات «العدد السحري» من الذرات في الجزيئة الواحدة ـ كانت مسيطرة، وكان C60، وهو أكثرها إلفاتاً للنظر، يتألف من ستين ذرة كاربون. وقد وجد فريق العمل أن الأحوال في حجرة التفاعل ـ الضغط وتدفق الغاز ونبضات اللايزر المبخر ـ كلها أدت بصورة مستمرة إلى تكوين C60، وأيضاً إلى تكوين C70 الذي يماثله في سحره تقريباً. كان من الجلي أن هذه الجزيئات كان القصد منها: زيجات ذرية تعدّدية الزوج صُنعت في السماء. ومن خلال ملاحظة ثبات هذه الجزيئات التي جلبها القدر اعترى الباحثين الشك في كون هذه الجزيئات سلسلية من النوع الذي كان كروتو يحاول «اصطياده»، واعتقدوا أنها شيء مختلف: قفص، أو شكل مقفل محتوى ذاتياً.

وفكر كروتو بالقبة الجيوديسية (Geodesic Dome) التي أقامها المعماري الأمريكي بكمنستر فولر (Buckminister Fuller) لأول مرة في معرض مونتريال العالمي سنة 1967، وتساءل إذا ما كانت القبة تحوي ستين رأساً.

يقول كروتو إن[1] «جيم وزوجته قاما بتجارب تلك الليلة على نماذج قفصية، أما ريك فقد جرب بأشكال سداسية من الورق. وجد ريك أن نموذجاً يحوي أشكالاً سداسية فقط سيلتوي، لكنه عندما أضاف 12 شكلاً خماسياً حصل على كرة مقفلة ذات ستين رأساً. عندما قذف بالكرة على المنضدة في صباح اليوم التالي اعترتنا نشوة عارمة، فقد كانت جميلة إلى درجة يجب معها أن تكون صحيحة»[2].

أطلق الفريق على هذا الشكل الاسمَ الغريب (Buckministerfullerene). وبعد أحد عشر يوماً من التجارب والكتابة أرسلوا مسوَّدة عنوانها (C60: Buckministerfullerene) إلى مجلة (*Nature*). وتروي الجمل القليلة في افتتاحية المسوّدة، التي نشرت في تشرين الثاني/ نوفمبر 1985، قصة جزيئتهم الجديدة بطريقة بارعة الإيجاز:

في تجارب تهدف إلى فهم الآليات التي تتكون بموجبها جزيئات الكاربون طويلة السلاسل في الفضاء بين النجوم وكذلك في القشرات المحيطة بالنجوم، تمّ تبخير الغرافيت بواسطة الإشعاع اللايزري، لينتج عن ذلك عنقود ذو استقرارية مدهشة يتألف من 60 ذرة كاربون. واقترحنا ـ في ما يخص قضيةَ «أيٍّ من بنى 60 ذرة من الكاربون يمكنه إعطاء نوع فائق الاستقرار؟» ـ شكلاً مبتوراً ذا 20 وجهاً، أو مجسماً ذا 60 رأساً و32 وجهاً، 12 منها خماسية الأضلع والعشرون الباقية سداسيتها. وهذا الشكل تراه عادة مثل كرة القدم. إن

---

(1) H. W. Kroto, «C60 - The Third Man,» *Current Contents*, vol. 24, no. 36 (1993), pp. 8-9.

(2) المصدر نفسه.

جزيئة C60 الناتجة عن وضع ذرة كاربون على كل رأس لهذا «الهيكل»، تكون تكافؤات ذرات الكاربون فيه مؤمّنة بآصرتين مفردتين وآصرة واحدة مزدوجة، ويمتلك هذا الهيكل العديد من البنى الرنانة كما يتبين أنه عطري[3].

حاز كيرل وكروتو وسمولي جائزة نوبل للكيمياء سنة 1996 عن اكتشافهم هذا. وقد شكلت هيكلية C60 وخواصها مورداً واسعاً لفرص بحثية.

استمرت المجموعة في بحوثها محاوِلةً إحداث تفاعل بين ما دعوه «كُرات باكي» (Bucky Balls) ومركبات أخرى، لكنهم فشلوا، ما زودنا بأدلة إضافية عن استقرارية C60 وعن كونها قشرة مغلقة. هذه القشرة، نجحت المجموعة حتى في إحاطة ذرّات معدنية بها، وهي لم تلبث أن انكمشت على ذرة المعدن، وقاموا باستخدام شعاع لايزري لتضييق القفص الكاربوني على ذرة المعدن داخله، باستهداف ذرتي كاربون في كل مرة. ولما قاومت ذرة المعدن ذات الحجم المحدد أي تقييد إضافي توقف التضييق. وكانت القشرة قد انهارت بما فيه الكفاية لتحيط بذرة المعدن بصورة وثيقة. تعلم الباحثون من ذلك المزيد عن حجم القفص.

وأتاحت طريقة أخرى لتبخير ذرات الكاربون من الغرافيت في أوائل التسعينيات للعلماء إنتاج كميات كبيرة من كُرات باكي. تبيَّن لنا اليوم أن الطبيعة كانت تصنع كُرات باكي منذ آلاف السنين إلا أننا ببساطة لم نحلِّلها، ففي شمعة محترقة يحوِّل اللهبُ الشمعَ إلى بخار، أي جزيئات تحوي خليطاً من الكاربون والأوكسيجين

---

(3) H. W. Kroto [et. al.], «C60: Buckminster- Fullerene,» *Nature*, vol. 318 (3) (1985), pp. 162-163.

والهيدروجين. ووسط هذا السخام المحترق الساخن الذي ينتج في الجزء الأصفر من اللهب هناك كُرات باكي. وتوجد هذه الكرات إيضاً في الغبار الـ «بيننجومي» الذي اجتذب كروتو، وفي تشكيلات جيولوجية على الأرض كذلك.

ومع الإنتاج الوفير الناجح لـ C60، تمّ دراسة خواصه بالتفصيل وتم استغلال العديد منها. ويبين الفصل الرابع من هذا الكتاب كيف أن كُرات باكي تزيد من كفاءة تحويل الطاقة في الخلايا الشمسية الرخيصة والمرنة والتي يمكن لبسها. الفصل الخامس يتحدّث عن دلائل نجاح بعض أنواع كُرات باكي المحفَّزة ضوئياً كعلاج للسرطان، لكننا أيضاً نثير أسئلة بخصوص تأثيراتها البيئية. ويبين الفصل التاسع كيف أن كُرات باكي قد نتج عنها مواد تسمح لشعاع لايزري واحد بأن يتحكم بشعاع آخر، ويحدث ذلك في واحد من التريليون من الثانية.

ليست الكرات الزائفة من ستين ذرة كاربون بالحاجة النانوية الوحيدة التي تم اكتشافها في العقود الأخيرة، فالأنابيب النانوية أو أنابيب باكي تنتج أيضاً بتبخير الغرافيت في بيئة متحكَّم بها. وتمتلك هذه الأنابيب ـ مثل كُرات باكي ـ أقطاراً نانوية، لكنها تخالف كُرات باكي في أن طولها يصل إلى مئات النانومترات أو أكثر. اكتشفت هذه الأنابيب من قِبل سوميو آيجيما (Sumio Iijima) في مختبرات شركة (NEC) في مدينة تسوكوبا (Tsukuba) في اليابان. كان آيجيما يدرس إمكانية إنتاج كُرات باكي من خلال إمرار تيار في الغرافيت، وعندما قام بتفحص نتائج التفاعل باستخدام مجهر إلكتروني بقابلية تحليل (Resolution) بقياس النانو، رأى أنابيب نحيفة طويلة هي الأنابيب النانوية.

وأظهر كل من توماس إيبيسن (Thomas Ebbesen) وبوليكل

أجايان (Pulickel Ajayan)، الباحثين مع آيجيما، إمكانية إنتاج كميات أوفر من الأنابيب النانوية من خلال تغيير الحالة في غرفة الإنتاج.

الأنابيب النانوية الكاربونية هي في الحقيقة صفائح الغرافيت الملفوفة، أي الترتيب ثنائي الأبعاد لذرات الكاربون التي تتكدس فوق بعضها لتعطينا الغرافيت بطريقة تشبه البقلاوة.

إن الأشياء أحادية البعد ذات القطر النانومتري هي موضع اهتمام المنظِّرين والمجرِّبين سوية، إذ يتوقع بامتلاكها قوة غير عادية وخواص إلكترونية جديدة. هذه الأنابيب النانوية، المبنية من عدد متباين من الطبقات، لم يكن فهمها سهلاً، إذ إن ما سيطر على سلوك المجموعة هو الاختلاف بين أنبوب وآخر، فالعديد من الألحان البديعة بمفردها ستعطينا فوضى صوتية إذا ما تداخلت من دون تنظيم نغمي.

وتم تصنيع أنابيب نانوية بسمك صفيحة كاربون واحدة للمرة الأولى سنة 1993 من قبل دونالد بيثيون (Donald Bethune) وزملائه في مركز بحوث ألمادن (Almaden) التابع لـ (IBM) في كاليفورنيا، وكذلك من قبل مجموعة آيجيما. ونتج عن إضافة معادن مثل الكوبالت إلى الغرافيت أنبوب دقيق ذو جدار مؤلف من طبقة واحدة. وبرهنت هذه العدد كونها أكثر بساطة للفهم، وأن خواصها أكثر نقاوة من أنابيب النانو الأصلية.

وقد تبين بعد ذلك أن اختلاف الأنابيب النانوية لا يقتصر على حجمها، وحتى تلك التي من نفس القطر يمكن أن تبدي خواص متباينة، فهناك أكثر من طريقة لتغليف قنينة من النبيذ: يمكن وضع حافة ورقة التغليف مع النهاية العليا للقنينة ومن ثم لفها حولها، أو أن توضع باتجاه 30 مع استقامة القنينة ومن ثم تلف عليها، أو بأي

زاوية أخرى أيضاً. والخيار مع الأنابيب النانوية ليس بهذه الإتاحة، إذ إن عليها الارتباط ذرة بذرة بعد أن تكون التفَّت لتشكِّل أسطوانة. لكن يتبقى العديد من الطرق لإنشاء ربط مثالي، مثل لف صفائحها بزوايا مختلفة بالنسبة للصفوف التي انتظمت بموجبها الذرات. إن زاوية اللف تحدد خواص الأنبوب النانوي، فسلوك بعضها يشابه سلوك أشباه الموصلات، بينما يماثل بعضها المعادن، فالمعادن تنقل الكهرباء في كل الظروف، وبطريقة جِبِلِّيَّة فيها، فهي لا توفر المسلك الذي يمكن للإلكترونات سلوكَه وحسب، بل توفّر حتى الإلكترونات الضرورية لعملية النقل. أما أشباه الموصلات فهي من دون تدخّل خارجي توفر السكة لكنها لا توفر الإلكترونات التي تنقل التيار الكهربائي، وهي تحتاج إلى مصدر محفِّز لهذه الإلكترونات، كالضوء، أو الحرارة، أو جهد كهربائي، أو ذرات «فاعلة خير» غنية بالإلكترونات تتبرع بها لغرض النقل.

قام الباحثون، وتحت تصرّفهم هذا الفهم للأنابيب النانوية، باستقصاء العلاقة بين البنية والسلوكية، فالأسطوانات دقيقة إلى درجة تجبر الإلكترونات على اتخاذ شكل أنبوبي غير اعتيادي، مقلِّدة بذلك بنية أنابيب باكي ذاتها، فإذا ما نظر باتجاه شعاعي من مركز الأنبوب إلى الخارج يتبين أن الإلكترون محاط بصفيحة من الغرافيت سمكها ذرة كاربون واحدة. إن الإلكترون عند اجتيازه الأنبوب محيطياً يجب أن يتصل رأسه بذنبه. ولا تتمكن هذه الإلكترونات الأنبوبية من التدفق إلا في اتجاه واحد، أي الاتجاه الطولي، وتأتي الطاقة التي تجعل الإلكترونات تتدفق من وضعها النسبي التفصيلي، أكان ذلك شعاعياً أو محيطاً بالأنبوب.

ولما كانت الخواص الإلكترونية تعتمد بقوة على تفاصيل القطر النانوي وعلى طريقة اللف وطريقة قَفْل النهاية، لا يتعلم المرء إلا

القليل من خلال النظر إلى مجموعة من الأنابيب النانوية المختلفة. بدلاً من ذلك، تمكّن كل من تشارلز أولك (Charles Olk) وجوزف هيريمانز (Joseph Heremans) من مختبر البحوث لشركة جنرال موتورز من قياس خواص أنابيب مفردة، وبينوا ـ كما افترضت النظرية ـ أن بعض الأنابيب النانوية معدنية، بينما الأخرى من أشباه الموصلات. وقد مكَّن فهم العلاقة بين البنية والوظيفية من استخدام الأنابيب النانوية مؤخراً لصنع ترانزستورات، وهي أحجار البناء لرقاقات الحاسوب اعتماداً على جزيئة واحدة (الفصل السابع، **الاحتساب**).

تمثل كُرات باكي وأنابيب النانو الكاربونية بشائر النجاح والتحدي لقدر كبير من الجهود الهندسية المبكرة على مستوى النانو. إنها جزيئات «موصى عليها» قامت الطبيعة بهندستها حسب متطلباتنا. ولما كانت الطبيعة بارعة بهذا القدر الذي في جعبتها من الحيل، فعلى الباحث العلمي إيجاد الطرق للحصول على الحجم واللون للأرنب الذي سينطلق من قبعتها. ولعمل ذلك باستمرار، فقد وجد سمولي وزملاؤه مثلاً أوضاع شدة نبضه اللايزر وحِدّتها بحيث إن كُرات باكي تتكون بصورة انتقائية متجاوزة كل أنواع عناقيد الكاربون الأخرى. وتقوم الطبيعة في النانوتكنولوجيا من القعر إلى الأعلى بأداء العمل، ونقوم نحن بحصاد جهودنا. وإذا ما كانت أعمَال الطبيعة جميلة وملونة بسخاء، فكيف يمكننا توجيهها لبناء ما نحتاجه؟ أو كخيار آخر: كيف يمكننا فصل الحبوب عن القشور؟ إن الحاجة لإدارة، لا بل في الحقيقة استغلال الاختلاف في الخواص في إنتاجية الطبيعة الهائلة، بدل التحدد ضمنه، هو واحد من المواضيع التي سيتقصاها هذا الكتاب.

وهناك جسيمة نانوية مبكرة أخرى تتغلغل في هذا الكتاب: نقاط الكم، وهي بلورات ذات قطر يبلغ بضع نانومترات. إن اختيار

العناصر المدمجة لصنع هذه البلورات يحدد خط الشروع لخواصها. ويقدم عامل تنغيم آخر من خلال تأثير الحجم الكمي، فشبه الموصل الذي نجده في البرية يجب من خلال تعريفه أن يمتلك فجوة في النطاق الموجي - أرضية مزودة بالطاقة لا تعود لأي إلكترون. ويحدد حجم هذه الفجوة أياً من ألوان الطيف الضوئي يتم امتصاصه، فالضوء الساقط على شبه الموصل لن ينجح - إذا ما كانت طاقة فوتوناته أصغر من فجوة النطاق الموجي - في رفع طاقة الإلكترونات داخله إلى طاقات أعلى. قد يحاول رفعهم إلى المستوى الأعلى، لكن إذا كانت الطاقة غير كافية فإن الإلكترونات ببساطة لن تصل إلى الطابق الثاني من البناية. وقد أظهر الباحثون مؤخراً أنهم يستطيعون التحكم بشكل نقطة الكم كذلك، وأتتنا من مختبر بول أليفيساتوس (Paul Alivisatos) في جامعة كاليفورنيا في بيركلي أشكال تسلب اللب. وقاموا في سنة 2004 ببناء أشكال من رباعيات الأرجل التي كانت أيديها مصنوعة من توالٍ متحكَّم به للمواد[4].

لقد شهدت نقاط الكم وأخواتها استعمالاً واسعاً في أوائل أيام النانوتكنولوجيا.

وهي تؤدي دوراً رئيسياً في هذا الكتاب في تشخيص السرطان في أولى مراحله (الفصل الأول، **التشخيص**) كما تربط الناس وتكنولوجيا المعلومات بأساليب جديدة (الفصل الثامن، **التفاعل**) وتبني شبكة إنترنت ضوئية مرتبطة بطريقة رشيقة إلى البنى التحتية

---

(4) Liberato Manna [et al.], «Controlled Growth of Tetraped- Branched Inorganic Nanocrystals,» *Nature Materials*, vol. 2 (June 2003), pp. 382-85, and Delia J. Milliron [et al.], «Colloidal Nanocrystal Heterostructures with Linear and Branched Topology,» *Nature*, vol. 430 (8 July 2004), pp. 190-195.

لشبكة اتصالاتنا اللاسلكية النامية (الفصل التاسع، **الإيصال**) وتسخّر قوة الشمس الوفيرة بكفاءة متعاظمة (الفصل الرابع، **توفير الطاقة**) وتقلد براعة الحياة في بناء جزيئات صلدة لكنها قابلة للالتواء وخضراء ووردية وحلوة لكنها سائغة (الفصل السادس، **المحاكاة**).

تنظيم الجمل

إن الجسيمات النانوية، من خلال تشبيه بناء معان من أحرف لأبجدية محدودة، هي كلمات رائعة، وبالأحرى طويلة. إنها تعابير جديدة في اللغة الدارجة على المقياس النانوي وإضافات إلى المفردات الفعالة في لغة الجزيئات التي استخدمها العلميون. لكنها لوحدها على أي حال تتركنا بعيداً عن كتابة جمل كاملة. وسنبقى من دون تراكيب كلامية وقواعد تربط بين الكلمات في عالم تمثيل الأشياء بدل عالم الأفكار.

كان جان ـ ماري ليهن (Jean - Marie Lehn)، الحائز في سنة 1987 على جائزة نوبل في الكيمياء مشارَكةً، قد عرف مجال اهتمامه في كيمياء مافوق الجزيئية (Supramolecular Chemistry) كالتالي «الذرات هي الأحرف، والجزيئات هي الكلمات، والكيانات فوق- الجزيئية هي الجمل والفصول»[5]. وقد وسّع ليهن فهمنا حول كيفية تفاعل الجزيئات في ما بينها، مركِّزاً على فكرة التعرف بين الجزيئات واسعة الانتشار في الطبيعة. وسنكون من دون تعرف الجزيئات جثثاً هامدة، إذ إن إيصال الإشارات عبر جهازنا العصبي يعتمد عليها، فلكي يعمل جهازنا العصبي يجب على خلايانا العصبية أن تتعرف

Nobel Prize Interview (Video) Available on Nobel Prize Web site: (5) http://nobelprize.org

على الفرق بين ذرتين متماثلتين في كل شيء تقريباً، إذ إنها كرات لها نفس الشحنة مع اختلاف بسيط في الحجم. لكن البروتينات في أغلفة خلايانا تميز بوضوح الذرات ببراعة على مقياس يقل عن النانو. ويقدم نظامنا المناعي مثالاً رائعاً آخر، فالمولد المضاد (Antigen) هو أي شيء يمكن أن يطلق استجابة مناعية، أكان ذلك باكتيريا أو فيروس أو حبوب طلع.

أما الجسم المضاد (Antibody)، فهو جزيئة أنتجها جهازنا المناعي لتشخيص الأجسام الغريبة ومن ثم تحييدها. وكل جسم مضاد في جهازنا المناعي مسؤول عن تمييز مولد مضاد محدد. إن تعقيد الشكل والكيمياء الجزيئية يوفران تطابقاً يماثل تطابق المفتاح والقفل، أو أنها أقدام سندريلا تنزلق في حذائها المميز.

إن ولع ليهن بتفاعلات الجزيئات ـ سوسيولوجيا الجزيئات، قادم من إدراكه أنها قلما نجدها وحدها، وأنها بصحبة جزيئات أخرى ستبرز على الأغلب خواصها المميزة. الماء كجزيئة بسيطة ذرةُ أوكسيجين واحدة وذرتا هيدروجين، أي مثلث. ويقدر المرء أن يدرس جزيئة الماء المفردة، ويقوم بذلك عدد من العلماء بالفعل، لكن الجزيئة الواحدة لا تعترف بفكرة الذوبان والتبخر والتجمد. أما المجموعة، فلها خواص مختلفة تماماً من الجزيئة المفردة. وكان قصد ليهن استنتاج خواص المواد من بناها النانوية التي تشكل أساسها بدل اختزالها إلى مكوناتها الذرية والجزيئية. ولا يقدر المرء أن يختزل انصهار أو تجمد الماء إلى جزيئة واحدة، لأن تلك الفكرة ضمن محيط جزيئة واحدة لا معنى لها. لكن معرفة خواص هذه الجزيئات وثيقة الصلة بارتباطاتها البينية يمكن المرء من استنتاج خواصها الجمعية.

وقام ليهن بعد ذلك ببناء كيانات جزيئية يمكنها التمييز بين

كرات صغيرة وأخرى كبيرة ـ أي تمييز جزيئي على أصغر المقاييس، وهو طول الذرة. أما شريكه في جائزة نوبل تشارلز بيدرسون (Charles Pederson)، فقد بين سنة 1967 قدرته على استنباط جزيئات يمكّنها حجمها وشكلها من الارتباط بذرات مختلفة. وكان الشكل هو العنصر السائد الذي أدى إلى هذه الانتقائية، أي التوافق بين جزيئاته والأيونات ذات العلاقة. أما مساعدهما دونالد كرام (Donald Cram)، فقد بين قدرته على تصميم جزيئات مضيفة يمكنها ربط ضيوفها من الذرات بقوة وبانتقائية، فإحداها تتمكن من ربط إيونات الصوديوم بقوة تفوق قوة ربطها لإيونات الليتيوم بنصف مليون مرة. وامتلكت هاتان الذرتان شحنات متشابهة وشكلاً متشابهاً أيضاً واختلفتا بصورة ظاهرة في الحجم فقط.

وقد تقبل كل من كرام وليهن تحدّي إظهار تباين في تصاميم الربط الدقيقة للإيونات في كل الأشكال والأحجام والشحنات، وقاما باستخلاص الذرات السامة من البيئة دون التأثير على الذرات الأخرى. وأبدى كرام أيضاً قدرته على فرز البروتينات الصغيرة التي انحصر اختلافها في كون أحدها يمثل خيالاً في المرآة للبروتين الآخر، أي إن جزيئاته كانت قادرة على تمييز اليمين من اليسار. واستطاع كرام وليهن بناء جزيئات جديدة تقوم بمحاكاة الأنزيمات البيولوجية.

ولم يقتصر عمل ليهن خلال بنائه جملاً من الجزيئات على التعامل مع الأسماء ـ الجزيئات المفردة ـ فقط، بل تعدى ذلك إلى الأفعال. إن تركيزه على تشكيل المزدوجات في خدمة المهمة قادته من علم النانو الوصفي إلى رواية القصص عن الجزيئات. ولم تكن جزيئات ليهن أول سرد قصصي كتبته يد الإنسان على المقياس النانوي، لأن الكيميائيين كانوا ينشئون تفاعلات جديدة لقرون. لكن

المقدرة على تصميم تفاعلات بين الموضوع-المادة حسب الرغبة مكّننا من حبك روايات أعمق.

تعلم القراءة

كيف يمكننا التأكد من معرفة كل هذا؟ والتقنيون النانويون كثيراً ما يسألون: كيف يمكن أن يكونوا واثقين من نجاحهم في هندسة خواص جديدة ضمن بنى جديدة، في حين أن البنى موضوعة البحث تصغر بنحو ألف مرة عما يمكننا رؤيته بأحسن مجهر بصري. إننا لحسن الحظ نستطيع أن نرى أشياء بهذا الصغر، إنما ليس بالمجهر البصري التقليدي الذي لا نفع له للقياس النانوي. وهناك في كافة المجاهر حدٌّ للأداء، أي أصغر الأشياء التي يمكن تمييزها. وتحدد طبيعة الموجة في الشعاع المستخدم لتتبع الشكل ثنائي الأبعاد للجسم الذي يتم فحصه، حدَّ الأداء للمجهر. وقد تم تحسين المجاهر الضوئية التقليدية التي كانت حاسمة في فهمنا للبيولوجيا منذ نحو سنة 1600 حتى وصلت حداً قرره الطول الموجي للضوء. لذا لا يستطيع مستخدموه من تمييز أشياء يقل بعدها عن عدة مئات من النانومترات.

لذا تم اللجوء إلى حركة موجبة أخرى ـ أصغر بكثير من موجات الضوء.

وقد مُنحت جائزة نوبل للفيزياء سنة 1986 جزئياً إلى إرنست راسكا (Ernest Ruska) من معهد ماكس بلانك في برلين «لعمله الأساسي في بصريات الإلكترون، ولقيامه بتصميم أول مجهر إلكتروني»[6]، فقد قام راسكا، وهو طالب في الجامعة التكنولوجية ببرلين، وكان لم يزل في أوائل العقد الثالث من العمر في نهاية

(6) Nobel Prize Wen site: http://nobelprize.org

عشرينيات القرن العشرين، باستقصاء كيفية توجيه حزمة من الإلكترونات بواسطة ملف، أي عدد من لفات أسلاك يمر بها تيار كهربائي ممغنط. واكتشف كيفية تركيز الحزمة في نقطة بؤرية محصلاً بذلك على عدسة. وقام راسكا بتشعيع الجسم مستخدماً الإلكترونات، وسجل الخيال الذي حصل عليه على شاشة متوهّجة أو على صفيحة فوتوغرافية. واستطاع راسكا باستخدام عدستين أو أكثر من زيادة التكبير. ومع حلول عام 1933 كان راسكا قد بنى مجهراً لا يعتمد على الفوتونات بل على الإلكترونات، وأعطى صورة أفضل من تلك المستحصلة بالمجاهر الضوئية بصورة ملفتة للنظر. ومع نهاية الثلاثينيات كان راسكا يعمل مع زملائه في شركة سيمنز (Siemens) لابتداع أول مجهر إلكتروني تجاري ينتِج على مجال كبير.

وتتيح الصور المستحصَلة من المجاهر الإلكترونية العاكسة (Transmission Electron Micorscopy) أو (TEM) اليوم تمييزاً لأبعاد تصل إلى 0,1 من النانومتر موضحة أعمدة الذرات في البلورات بسهولة. وقد حصلت المجاهر الإلكترونية العاكسة في السنين الأخيرة على إمكانية جديدة وهي إمكانية تحديد التركيب الكيميائي إضافة إلى إمكانياتها على تحديد موقع البنى الفيزيائية، فالذرات المختلفة تتفاعل بطريقة متميزة مع الإلكترونات ذوات الطاقات المختلفة مؤكدة بذلك على أن المجاهر التي تحلل طاقة الإلكترونات المنعكسة والمشتتة تحوي توقيع العناصر التي تتألف منها المادة موضوعة الفحص. لذا بإمكاننا اليوم الحصول على صور لبنية المادة وطبعة إصبع لمكوناتها على المستوى الذري.

وقد برزت تقنية جديدة لرؤية الذرات وللتلاعب بها في الحقيقة في زمن أحدث، فقد ولدت المجاهر الماسحة الثاقبة (Scanning Tunneling Microscopes) في الفترة التي بدأت تعرف بالسنين

التشكيلية للتكنولوجيا النانوية، أي في أوائل ثمانينيات القرن العشرين، وهي الفترة التي بدأ هذا الاختصاص يكتسب شخصيته، فقد ذهب النصف الآخر من جائزة نوبل للفيزياء لسنة 1986 إلى غيرد بينيغ (Gerd Binnig) وهاينريش روهرر (Heinrich Rohrer) اللذين يعملان في مختبر IBM للبحوث في زوريخ، «لتصميمهما للمجهر الماسح الثاقب». وهذا المجهر ليس مجهراً اعتيادياً بأي حال من الأحوال. إنه لا يعرض صورة للشيء الذي يخضع للفحص على شاشة، أكان ذلك بالانعكاس أو بالإرسال. ويقوم بدل ذلك بعملية مسح لسطح العينة كما يقوم الشخص الضرير بقراءة كتاب مطبوع بطريقة بريل متابعاً بإصبعه وبصورة نظامية جيئة وذهاباً كافة التنبؤات التي تصنعها الذرات. أما إبرة المسح، وهو بدقة ذرة واحدة، فيتحسس تغيرات نطاق سطح العينة ويرسلها إلى حاسوب يقوم يعرض صورة أو خيال معاد تركيبه.

وتطلب هذا المجهر جهداً هندسياً عبقرياً من قبل بينيغ وروهرر، فقد كانا يبحثان عن حركة إبرتهما على مقياس أصغر بكثير من قطر ذرة واحدة، لذا فإن أي اهتزازات في محيطهم ستخرب الصورة، وكان يجب على تصميمهم الميكانيكي امتلاك براعة هائلة. لذا وبدلاً من بناء مجهرهم على هيكل يمكن أن يتذبذب قاموا بعزله عن العالم الخارجي بوضعه على مغناطيس ثقيل عائم بصورة حرة على وعاء يحوي رصاصاً ذو قدرة فائقة على التوصيل.

وقد تم منذ ذلك الحين ابتكار طرق أقل عظمة لكنها بذات الفعالية، تعمل على عزل الذبذبات.

وتَمَثَّل بُعد النظر الثاني في عدم تسيير إبرتهم على ارتفاع ثابت فوق السطح بل على «ملمس» ثابت. إن عملية المسح بمجسّ سهل العطب تتألف نهايته من ذرة واحدة سيخرب المِجَسّ عندما تصطدم

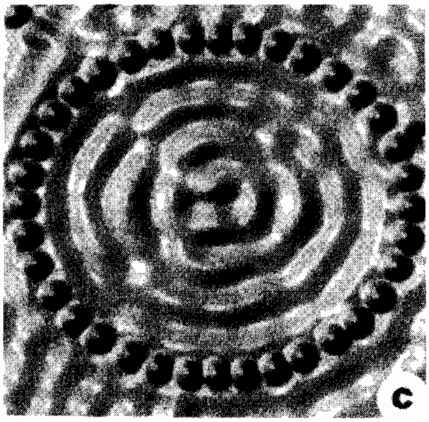
نهايته «بحبل» على السطح الممسوح. لذا قام بيبنغ وروهرر باستخدام التيار الثاقب، وهو التيار الضعيف لكن ذو الدلالة الذي يتسرّب من الإبرة إلى العينة كوكيل عن المسافة بين الذرة في نهاية إبرة المجس وسطح العينة الذي كان يتم استقصاء طوبوغرافيته.

ولا تتركز الإلكترونات بصورة حصرية في الأسلة (The Tip) بموجب قاعدة المشكوكية (Uncertainty Principle)، وذلك لكونها موجات تتبع ميكانيكا الكم، بل توجد باحتمالية ضعيفة لكنها محدودة في ذرات العينة التي تقرب منها أسلة المجس. نتيجة لذلك يتدفق تيار ثاقب تتطاير بواسطته الإلكترونات خلال الحيز المحرّم وإلى داخل العينة. ولما كان هذا التيار الضعيف يتناقص بسرعة مع الفصل بين العينة والأسلة، فقد اكتشف بينيغ وروهرر بديلاً فائق الحساسية للمباعدة بين المجس والعينة، فقد قاما من خلال التحكم بهذا التيار من الحفاظ على أسلة إبرة المجس على مسافة ثابتة من سطح العينة. وقاما من خلال مراقبة موضع هذه الأسلة التي تحمل التيار الثابت بقياس طوبوغرافية سطح عينتهم.

وكان موضع الأسلة يمسح ميكانيكيا في مستوى العينة بدقة أفقية تبلغ 0,2 نانومتر، وكان التحكم العمودي فوق النهاية المستخدم للحفاظ على التيار الثاقب ثابتاً يبقيها في حدود 0,01 نانومتر.

وبهذه الدقة ظهرت الذرات مثل جبل إفرست (Everest). وكانت الصور المنتجة باستخدام المجاهر الماسحة الثاقبة عبر العقدين الماضيين ملفتة للنظر، ويظهر أحدها في الصورة، وهو من مجموعة دون إيغلر (Don Eigler) في IBM[7].

(7) H. C. Manoharan, C. P. Lutz and D. M. Eigler, «Quantum Mirges =



صورة للذرات عل سطح ما باستخدام المجهر الماسح الثاقب (بموافقة من مجلة *Nature*)

وما هو ذو دلالة كبيرة في التكنولوجيا النانوية اليوم حول هذه الطرق في الفحص المجهري ليس غرابتها لكن حقيقة أنها أصبحت أمراً روتينياً، فالتقنيون النانويون يصورون عيناتهم كأمر طبيعي. إن عدم القيام بذلك سيكون كأن نعزو الوظيفة إلى البنية من دون أن نبرهن على الصلة، وبذلك نقوم بالالتفاف إلى الافتراض المركزي للتكنولوجيا النانوية، أي بناء شيء نفعي على مجال كبير من أشكال على مجال نانوي.

إن الطرق الجديدة للتحليل على المجال الذري والجزيئي لم تكن مقتصرة في أثرها على العلوم، إذ إن تركتها ثقافية أيضاً، فهذه الأجهزة غالية الثمن يكلف كل منها عدة ملايين من الدولارات. ويجب على كل معهد امتلاك واحدة على الأقل، لكن لا يمتلك كل مختبر في الجامعة أو الحكومة أو الشركة على وجه التأكيد مجهراً خاصاً به، فهذه الوسائل وأخرى مثلها يجب أن تكون تشاركية، وتصبح محلات لقاء للباحثين الذين يستخدمونها. وعادة ما تكون

Formed by Coherent Projection of Electronic Structure,» *Nature*, vol. 403 = February 2000), pp. 512-515.

قاعدة المستخدمين واسعة من البيولوجيين الراغبين في تصوير البنية الداخلية للمايتوكوندريا (Mitochondria) مروراً بالكيميائيين ونماذج الذرات ضمن جسيماتهم النانوية، إلى علماء المواد وتطابق البلورات النانوية التي تضفي القوة على صلب الإنشاءات. وتوفر الوسائل عامة الاستخدام موضعاً لالتقاء اهتمامات الباحثين الواسعة.

وقد حصلت لدي مواجهتان دافعهما التقنية مؤخراً مع شخصيتين مختلفتين، وكانت لهما نتائج مختلفة. كلاهما حدث عندما كنت استخدم مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscope) ـ وهو ابن عم المجهر الماسح الثاقب ـ لفحص كيف رتبت نقاط كمية نفسها بنمط متميز على شريحة زجاجية. كان اللقاء الأول مع باحث من مختبر آخر رأى صورة نموذجي وأدرك فوراً امتلاكنا اهتمامات مشتركة في ترتيب النقاط الكمية على السطوح. وقادنا هذا إلى البحث في الطرق الهادفة إلى تحسين تحكمنا بالطبقة التي تشكلها نقاط الكم.

وكان اللقاء الثاني استثنائياً بدرجة أكبر، فقد رأى باحث آخر نفس الصورة عن بعيد واعتقد أني كنت أدرس تنظيم كرات مادة اللاتكس (Latex) (نوع من المطاط)، وهي جسيمات بحجم مايكرون، على طبقة سفلى من اللدائن. لكني لم أكن كذلك، وكانت كراتي تصغر عن كراته بمئة مرة، ومصنوعة من مادة مختلفة كلياً وتحكمها كيمياء مختلفة ومنتظمة على سطح مختلف جداً. لكن حقيقة كون الصورتين في غياب البيئة متشابهتين بحيث لا يمكن التفريق بينهما حفزنا للبحث عن فهم للظواهر الفيزيائية الأساسية التي توحد تشكيل الأنماط ضمن أنظمة المواد المتباينة التي كنا نتعامل معها، فلماذا تبدو الغيوم مثل كرات القطن أحياناً ومثل الضباع أحياناً أخرى؟ وبعض الجزيئات مثل الأشجار؟ والذرات ونقاط الكم

وكرات اللاتكس مثل أسطح كارتونات البيض؟

إن أسلوباً يستخدم المنظور الجانبي المادة بطريقة دقيقة تساعده في ذلك طرق جديدة في العمل المجهري بحدود تمييز عالية جداً يكشف لنا الخيوط المشتركة بين نماذج اعتبرناها غير مرتبطة سابقاً. إن كون العلميين يجتذبون بالجماليات ويجمع بين أبصارهم وذهنهم سوية بعيداً عن الخلفية الفكرية العلمية الواسعة المدى، فكما قال هاري كروتو عندما افترض أن كرة باكي وكرة القدم الأوروبية القياسية وقبة بكمنستر فولر الأرضية كانت كلها ذات شكل مشترك «إنها جميلة إلى درجة يجب معها أن تكون صحيحة».

تعلم الكتابة

ويجب أن يتمكن المرء بالاعتماد على قواعد جان-ماري ليهن لسوسيولوجيا الجزيئات ـ مع معلومات وفهم غير محددين ـ الاستدلال على أصل كل شيء، فالذرات والجزيئات والتفاعلات البينية الجزيئية، والتعرف والتنظيم من خلال طبقة فوق طبقة من التعقيد، تؤدي في النهاية إلى كافة المخلوقات وإلى كل شيء آخر أيضاً. إن وضع تقليد مخلوقات الحياة للتعقيد الوظيفي من البساطة الذرية كهدف لنا يضع مشروعاً يفوق حتى مشروع الحياة ذاتها. إنها لم تخطط، بل رمت الزهر، وقامت الضغوط الانتقائية التي ساعدت على انتشار بعض الاختلافات بعملية الاختيار. أما التقني النانوي فيرغب بدل ذلك بتحديد نتيجة ـ نبات متسلق يحول الطاقة الشمسية إلى كهرباء، أو إكليل زهور ضد الرصاص ـ ويقوم بعكس هدفه حافراً الأنفاق للوصول إلى البذور الجزيئية التي ولدته. ويظهر اليوم أن التحدث المروع هو لتركيب أنظمة مبرمجة جزيئياً من الذرة صعوداً ذات تعقيد نجسده بذاتنا.

إن التفكير بالتصميم من القمة نزولاً هو أكثر تلاؤماً من أفكارنا الحالية عن التنظيم والتخطيط وذلك بتحديد الوظيفة ثم بتخطيط طرق تنفيذها. إن نجاحنا في بناء الحواسيب يبرهن عن كوننا ماهرين في تصميم وتخطيط منظومة معقدة تدار من الأعلى. ويتم الآن إصدار رقائق حاسوب جديدة يحمل كل منها مليارات الترانزستورات المرتبطة ببعضها كل ثمانية عشر شهراً. ويقوم مهندسو الحاسوب والمهندسون الكهربائيون بتصميم وبناء طبعات جديدة من هذه الرسائل والكلمات والجمل والمقاطع والفصول المرتبطة منطقياً بتحكم بديع. وقد تضاءل حجم الترانزستورات الداخلة في تصنيع هذه الرقاقات الحاسوبية ليقف اليوم على شفا حجم ما دون 100 نانومتر (الفصل السابع، **الاحتساب**).

إن قضية معمارية الحاسوب ذاتها هي من الصعوبة بمكان، فهي تمثل عملية تأليف سرد دقيق تحتاج إلى أسلوب نظامي لتناولها، وذاكرة ذات حجم هائل، وعين وأذن ليقتنصا التفاصيل. ويجب على المرء أن يضع خارطة لمجيء وذهاب فارينكا (Varenka) وفاسينكا (Vasenka) وفارفارا فرونسكي (Varvara Vronsky) في قصة **آنا كارينينا** (*Anna Karenina*) من دون ما دمج. إن القابلية على إقامة وربط هذه البنايات الخدمية، وبهذه الوفرة وبحيث يمكن استنساخها ومع هذه الارتباطات المعقدة في ما بينها، كان أمراً حاسماً بالنسبة لتمكننا من تكنولوجيات الحاسوب والاتصالات.

إن أحرف الأبجدية في عالم الحاسوب، وهي أصغر وحدة نقد يستخدمها المهندسون، ليست الذرات أو الجزيئات إنما الترانزستورات، فيقوم اتصال كهربائي واحد بالتحكم في تدفق التيار بين زوج آخر من الأقطاب. وتضخم الترانزستورات بهذه الطريقة الإشارات في الراديو وتعمل كمفاتيح تعمل فيها إحدى النهايتين على

التحكم بالأخرى. إن ربط هذه الترانزستورات بطريقة إسقاطية (حيث يتحكم الواحد بآخر أو مجموعة دونه في الدائرة الكهربائية) يؤدي بنا إلى دوائر منطقية معقدة داخل حواسيبنا.

وكانت صمامات الفراغ (Vacuum Tubes)، وهي أسلاف الترانزستورات، تؤدي نفس المهمة، وساعدت كمضخمات على انتشار الإلكترونيات المنزلية. وكانت هذه أساساً مصابيح ضوئية مع نهاية ثالثة تحكمت بالتيار بين زوج من الأقطاب (Electrodes). وقام لي دو فورست (Lee de Forest)، الفيزيائي والمخترع الأمريكي، بصنع الترايود (Triode) أو الصمام الثلاثي الذي أفاد كمضخم للإشارات الراديوية، وبذلك جعل البث الراديوي المعتمد على التضمين السعوي (AM) ممكناً. وخدم الصمام الفراغي الثلاثي في تقدم الحواسيب أيضاً واستخدم في بناء أنظمة نهاية الأربعينيات وبداية الخمسينيات. وأدت هذه الصمامات إلى مكائن حاسبة أكثر قوة من أي شيء سبقها. لكن صمامات الفراغ لها احتمالية الشرب، كما أن المعدن الذي يشع الإلكترونات داخل الصمام قد يحترق. واحتاجت إلى طاقة كبيرة جداً لتشغيلها. وكانت الحواسيب المبنية في نهاية الأربعينيات تشغل مساحة تقدر بألف قدم مربع (نحو ثلاثمئة متر مربع) وكانت المكائن ذات الألف صمام قليلة الموثوقية ومتعطشة للطاقة.

كان العلماء في العشرينيات قد بدأوا العمل نحو أسلوب آخر للتضخيم والمنطق لا يعتمد على الصمامات الزجاجية بل على البلورات. وشكلت وسائل تحتوي نهايتين معدنيتين ـ نهاية معدنية مدببة تلامس قطعة من بلورة شبه موصلة ـ الصمام الثنائي وهو أداة في قلب أجهزة راديو البلورة في سنة 1947 كان جون برادين (John Bradeen) وولتر براتان (Walter Brathain) العاملان في مختبرات بلْ

(Bell) للتلفونات يستقصيان سلوك الإلكترونات على وجه التقاء المعدن والمادة شبه الموصلة، وأقاما نقطتي اتصال متقاربتين على مادة شبه موصلة وبذلك حصلا على الترانزستور بدل صمام ثنائي. وعند ربط عدد من هذه الترانزستورات سوية تحقق لديهما مضخم (Amplifier). وبخلاف صمامات الفراغ ودوائرها لم يحتج هذا المضخم لوقت للإحماء.

وكانت اختراع الترانزستور قبيل عيد الميلاد لسنة 1947 قد مهّد لبروز تكنولوجيا أشباه الموصلات الحديثة، وحصول وليام ب. شوكلي (William B. Shockley) وجون برادين وولتر براتان على جائزة نوبل للفيزياء لسنة 1956. كانت الترانزستورات أصغر وأكثر موثوقية وأكفأ في استخدام الطاقة مقارنة بصمامات الفراغ، وساعدت على هندسة أنظمة أكثر تعقيداً ورأينا خلال فترة قصيرة عشرات الآلاف من الترانزستورات تربط سوية لزيادة تعقيد الحواسيب.

لكن هذه المكائن كانت لاتزال تبنى بطريقة مزعجة حيث يتم على أي حال لحام المكونات المفردة سوية مما جعل التوسع في الحجم تحدياً رهيباً.

وشابه الموقف طريقة إنتاج الكتب قبل اختراع غوتنبرغ للطباعة، حين كانت كل نسخة إضافية من الدوائر الكهربائية تدون باليد بصبر سكان الأديرة. وكان المطلوب بدل ذلك وسيلة لبناء وربط الترانزستورات كلها دفعة واحدة وطبعها مرة بعد أخرى مثل مطابع الكتب.

ووجد كل من جاك كلبي (Jack Kilby) من شركة تكساس إنسترومنتس في دالاس وروبرت نويس (Robert Noyce) من شركة

فيرشايلد سيميكونداكتور (Fairchild Semiconductor Corporation) خلال سنتي 1958 و1959 حلاً للمشكلة، أي طريقة لإنتاج العديد من الترانزستورات على منصة دوائر مفردة (Single Circuit Platform) دفعة واحدة. ومثل ذلك ولادة صناعة الدوائر المتكاملة (Integrated Circuits). وكان هذا الأسلوب قابلاً للتوسيع في القياس، فإذا ما كان بالإمكان طبع وربط عشرة آلاف ترانزستور، إذاً يمكن طبع وربط عشرين ألفاً بجهد وكلفة إضافية قليلة. وكان هذا يصح على وجه التخصيص إذا تمكنا من صنع ترانزستورات أصغر فأصغر، وإذا ما تحسن أداؤها مع تقلص حجمها، وسينتج عن هذا زيادة في الدمج وفي التعقيد للدوائر الكهربائية، وسيقودنا هذا إلى دورة قوية ذات نمو لوغاريثمي لبراعة وصقل أداء الحواسيب.

وقد دعي هذا الاتجاه باسم قانون مور (Moore's Law)، فقد لاحظ غوردون مور (Gordon Moore) من شركة إنتل من الستينيات بأن عدد الترانزستورات التي يمكن حشرها على مساحة محددة كان يتضاعف كل ثمانية عشر شهراً. وحاز جاك كلبي على جائزة نوبل للفيزياء (سنة 2000) لاختراعه للدوائر المتكاملة وهو اختراع قادنا إلى عقود من التقدم اللاحق بما في ذلك الحواسيب الشخصية وشبكات الهاتف ذات الأقفال الرقمية... والرسائل الإلكترونية الدخيلة المزعجة.

إن النجاح المنطلق لرقاقات السيليكون تشعب إلى فيزياء أشباه الموصلات المستحدثة والعدد المصنوعة منها. وأعطتنا أشباه الموصلات المثيرة التردد الموجي المايكروي (Microwave Frequency) واللايزرات المستخدمة لإنارة اتصالات الألياف الضوئية.

ويتم في أشباه الموصلات من هذا النوع صنع بنى عليا معقدة

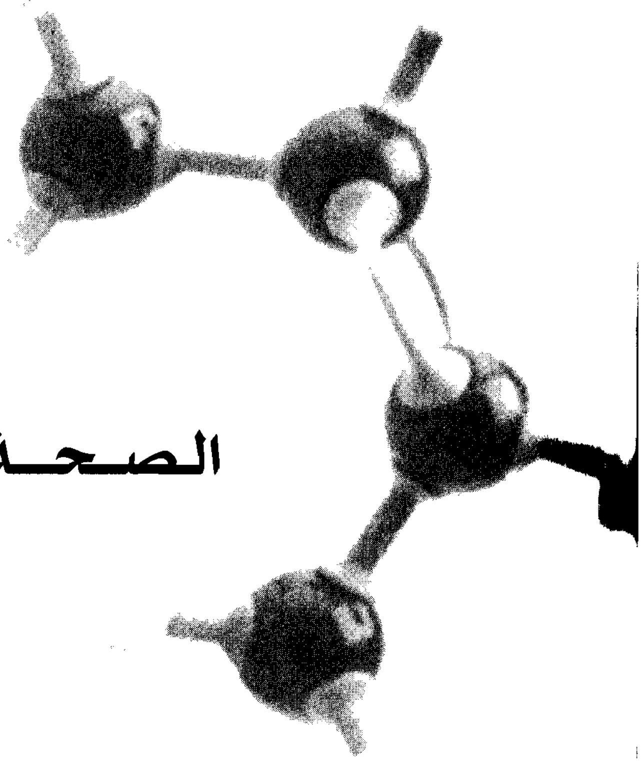
من بلّورة شبه موصلة وتتدفق الإلكترونات خلال مسلك دقيق التصنيع ذي عوائق. وقادت بشائر النجاح لمثل هذا التحكم الصارم على الإلكترونات كل من هيرب كرومير (Herb Kroemer) المشارك في جائزة نوبل للفيزياء سنة 2000 لابتداع القاعدة التي تسمح للترانزستورات بالعمل على أسس 600 مليار دورة في الثانية وذلك أسرع بمئة مرة من سرعة الترانزستور الاعتيادي وذلك سنة 1957. أما زوريس ألفيروف (Zhores Alferov) شريك كرومير (Kroemer) في الجائزة، فقد طور لايزر شبه موصل يتدفق منه كمّ كافي من الإلكترونات ثم يتوقف وذلك في قلب الأداة ليجعلها تضخم أشعة ساطعة من النور. إن هذه اللايزرات وصغر حجمها وأشعتها المركزة ونقاء نوع ضيائها وكلفتها الرخيصة، كانت أساسية لثورة الألياف البصرية في الاتصالات (الفصل التاسع، **الإيصال**).

وفي حين أن هذه الأشباه الموصلات دقيقة التصنيع تبدو مختلفة بصورة مثيرة عن الجزيئات، مثل كُرات باكي والأنابيب النانوية ونقاط الكم، وأنها مصنوعة بواسطة عملية تصنيع مختلفة كلياً، إلا أنها تعرض نفس الظواهر الفيزيائية، فهي توفر التحكم وكذلك المواد الهندسية المبنية خصوصاً عل المقياس النانوي وتبقى حتى اليوم أكثر الوسائل المتاحة لنا تهذيباً لتشكيل المادة لكي تؤثر على تدفق الحركة الموجبة للإلكترونات.

وضع الألحان لرقص الجزيئات

لقد رأينا أن من الممكن تصميم وبناء وتصور المادة على المقياس النانومتري. وعلينا الآن أن نصنع الألحان لرقصة الجزيئات لكي تتناغم مع المواهب والأذواق المتأصلة لفرقتنا للباليه على أن تكون رقصة يمكننا أن نفتخر بها. وأي طريقة أفضل لإبراز أسلوب

التقنيين النانويين ـ أي البناء من الجزيئة صعوداً ـ من قياس التقدم نحو تطبيقات ذات فائدة؟ وسنشخص في هذا الكتاب التحديات المركزية في صحة الإنسان والبيئة والاتصالات وسنتابع التقدم نحو هدف التقنيين النانويين، باستكشاف ديار التكنولوجيا النانوية الحالية والمستقبلية في البحث عن الأنغام الجزيئية الراقصة التي تخدم المجتمع.



الصحة

لقد رأى كل واحد منا صديقاً أو شخصاً عزيزاً يموت في عمر غض.

ويعرف كل منا أناساً ابتسرت متعتهم بمباهج الحياة بسبب المرض. وربما نعاني نحن أنفسنا من ذلك. وقد وجدت من خلال الحديث مع العائلة والأصدقاء بأن دور التكنولوجيا النانوية في الطب هو في قمة أفكار الناس، فأمريكا الشمالية تقوم باستثمار 6 مليارات دولار في البحوث العلمية والهندسية خلال سنة 2005 و30 مليار دولار في البحوث الصحية[1]. وتروي عناوين الصحف نفس القصة، فالسرطان وهشاشة العظام يتم «شفاؤهما» مرة كل أسبوع على الأقل في الصحف القومية. ولدينا شهية لا تشبع لإعادة التوكيد ـ وهو أمر ملح للعديد منا ـ في ما يتعلق بالمرض وكلفته بالنسبة لطول ونوعية الحياة.

علينا البدء بتحسين طرق التشخيص، ففي كل علة يمكن شفاؤها تقريباً ـ أكان شفاء كاملاً أو جزئياً ـ يحسّن التشخيص المبكر

(1) http://www.biomedcentral.com.

فرصنا لإطالة الحياة والتمتع بها بصورة كبيرة جداً. وسيشمل التحسين في أساليب التشخيص كل من التحسس والدقة في التحديد وستقوم هذه الأساليب التشخيصية باكتشاف المرض عند بروز أبسط آثاره، ولن تثير إنذاراً كاذباً يزيد الأعباء على نظامنا الصحي المثقل ويحول اهتمامه عن المسائل الأكثر أهمية. وما أن يتم تشخيص مرض ما فيمكن علاجه، وستكون أساليب الشفاء محددة أيضاً، فإذا ما كنا نعالج السرطان فعلينا أن نهاجم خلاياه وليس خلايا الأمعاء أو الشعر. وإذا ما كان علاجنا دقيقاً فسيمكن إعطاء جرعات كبيرة من الدواء ـ أي جرعات قاتلة لخلايا السرطان لكنها ليست قاتلة للمريض إذا ما كانت مصممة لمهاجمة ما نريد. والهدف الثالث في الطب ـ وذلك استقراء جَسور من العلاج الشافي التقليدي ـ هو استبدال الأعضاء التالفة بأخرى جديدة قبل أن يصل الموقف إلى نقطة اللاعودة. إن استبدال الأعضاء اليوم أصبح علماً ناجحاً مأمون النتائج. المشكلة هي عدم وجود عدد كافٍ من الأعضاء البديلة. ماذا لو استطعنا بدل انتظار المتبرعين ليأتوا أن نقوم بإنماء الأعضاء خارج الجسم؟ مزارع نسيجية تحت الماء.

يقوم تقنيو النانو من خلال التلاعب بالمادة، من الجزيئة فصعوداً، بزرع بذور ثورات طبية قادمة.

الفصل الأول

التشخيص

يحدث السرطان على المقياس النانومتري. إنه خطأ في الجزيئة أو غلطة في الـ «دي. أن. آي.» الذي يبرمج قدرنا. إن العشرات بحجم النانومتر لها مترتبات عظمى على الإنسان، فنحن في داخلنا نعج بالآليات الجزيئية، وهناك محركات تدور لتمتص طاقة السكر المخزونة، وجزيئات للنقل تسحب أحمالاً ثقيلة عبر سكك لا يزيد عرضها عن نانومتر تقيم جسراً بين طرفي خلايانا. وتبغي الباكتيريا الخطرة استعمار أجسامنا، لكننا ننتج جزيئات تقاوم غزوها. ومثلما هي الحالة بين دايفد (David) وغولياث (Goliath) تقوم جزيئاتنا ذوات العشرة نانومترات باستخدام مكرها لتخدع مهاجمين يفوقونها في الحجم عشرة أضعاف. وتحدث الغراميات أيضاً، فكون المقدر لخليتين أن يكونا معاً مرتبطتين إحداهما بالأخرى لا يمكن تقديره من مسافة محتشمة من خلال تدقيق دخل وذكاء وتاريخ عائلة كل منهما، وتصبح الخلية بدل ذلك محلاً للعربدة، فهناك جزيئات تجرب إحداها الأخرى من حيث الحجم مع اختلاط حميمي مدهش، فالجزيئات إما أن تتوافق في ما بينها أو لا تتوافق، اعتماداً على الحجم والشكل والإلفة.

وتتوافق المفاتيح الجزيئية بصورة فريدة مع أقفال خاصة. وعندما يتعرّف مفتاح وقفل أحدهما على الآخر يطلقان العنان لتتابع كامل من الفعاليات الحياتية الحاسمة: إطعام أو إكثار أو موت خلية، فجزيئات البروتين تبدأ كسلاسل بسيطة لكنها سلاسل ذات تعليمات مطوية، وهي مثل الأوريغامي(*) (Origami) ينتج عنها تنويعة مدهشة من الأشكال حين تقوم الطبيعة بتنفيذ تلك التعليمات. ولا تتعاشق البنى المعقدة الناتجة عن ذلك إلا انتقائياً.

ويحتوي الـ «دي. أن. آي.» الشفرة التي تصف سلسلة الجزيئات التي تؤلف البروتين وتحدد من خلال هذا شكل ووظيفة البروتين المعقد المطوّى. والترجمة من الـ «دي. أن. آي.» إلى البروتين هي كالتحول الحرفي من الإنجليزية الفصحى إلى العامية. والـ «دي. أن. آي.» في أجسامنا يشكل مكتبة كاملة تصف كل بروتين نحتاجه. ويمكن استنساخ عدد غير محدود من النسخ لإنتاج مليارات من مفاتيح البروتينات المتماثلة من كل نوع يستخدم يومياً في خلايانا.

وضمن طنين هذا الكم من الفعالية لا عجب من حدوث خطأ بين فترة وأخرى. وقد تكون النتيجة إما سليمة أو قد يكون لها عواقب، فالمكائن التي تصنع البروتينات داخل خلايانا تبعاً لتعليمات الـ «دي. أن. آي.» قد تخطئ من دون أي مترتبات، فقد يعوم مفتاح لا فائدة منه ولا يتلاءم مع أي محل. لكن خطأ في نسخ محتويات مكتبة الـ «دي. أن. آي.» عندما تنقسم الخلايا في عملية التكاثر سيغير على أي حال مجموعة البروتينات التي تصنعها الخلية. وإذا لم تستطع الخلية البقاء من غير البروتينات الصحيحة فإنها ستموت، أما إذا كان التغيير الحيوي يغير بدوره طريقة عمل البروتين

(*) الأوريغامي (Origami): فن الورق المطوي الياباني.

ومن خلاله الخلية ولكن ليس بدرجة كارثية، فسيختلف عن طريق الصدفة نوع جديد من الحياة ـ وهذا معناه تفريخ مرض جديد.

إن الحياة تعني اقتراف أخطاء أي تقبل التغيرات التي تحدث عن طريق الصدفة أو التعرض للأخطار. وإذا لم نكن قادرين على تجنب الأخطاء فمن الأفضل لنا أن نتعلم كيف نكتشفها مبكراً وكيف نتصف بناء على هذه المعلومات بطريقة حازمة.

إن فرصة الاكتشاف المبكر يمكن أن تغير طريقة تعاملنا مع السرطان، فبطانة القولون الصحيحة قد تنمو فيها سليلات مخاطية (Polyps) يمكن عبر مدة سبع إلى عشر سنوات أن تتطور إلى سرطان، تبعاً لما يقوله أستاذ الطب ومدير مركز الطب السريري للنمو الخبيث في القولون والمخرج، في (مايو كلينيك)[1] في مينيسوتا الدكتور دايفد آلكويست (David Ahlquist). وبدلاً من انتظار السليلة المخاطية أو الورم السرطاني ليصبح ظاهراً كورم يحوي نحو مليار خلية، لماذا لا نستطيع رؤيته عندما يكون مجرد جزيئة أو ربما بضع خلايا؟ وقد يصبح القول بأن الناس يجب أن يموتوا بالسرطان خطأ مرده وضعنا التاريخي، مثل التفكير الخاطئ عن الطاعون أو السل في فترات سابقة، وعند ذلك سننظر إلى اعتقاداتنا الطبية على أنها متخلفة.

يمكن للتكنولوجيا النانوية أن تساعد في هذا السعي للتشخيص المبكر قبل انتشار السرطان وقبل أن يتمكن الألزهايمر من الفرد. وقد بدأ الباحثون بالكشف عن الخلايا والبروتينات والجينات. وقد يوفر الطب بمساعدة التكنولوجيا النانوية الحماية للمريض في وقت مبكر، فبدلاً من البحث عن أورام كبيرة بدأنا نكتسب القدرة على الكشف

(1) http://www.fda.gov.

عن كل خلية ونحبط الخبيث قبل أن يعيث في الجسم فساداً.

إنارة خلايا السرطان

نستخدم في الطب التقليدي اليوم تقنيات تصوير مثل التصوير المقطعي بواسطة الحاسوب (Computed Tomography) (اختصاراً CT)، أو التصوير بالرنين المغناطيسي (Magnetic Resonance Imaging) (اختصاراً MRI) للنظر إلى البنى المشكوك فيها وإلى الأورام من حجم حبة عنب صغيرة. عندما يصل الورم هذا الحجم، فإنه يحوي مليار خلية، وقد مرت هذه الخلايا بثلاثين عملية تكاثر، ما أعطاها فرصة جيدة للانتشار خلال جسم المريض.

وفي صيف سنة 2004 قام الأستاذ شومنغ ناي (Shuming Nie) وفريقه في معهد جيورجيا للتكنولوجيا باستخدام التقنية النانوية للنظر إلى أعلام مفردة على سطح الخلايا ولإنارة تلك من بينها التي تنم عن السرطان فقط(2). وقالوا في تقريرهم إن السرطان سيمكن في المستقبل اكتشافه عندما يصل عدد خلاياه إلى ما بين 10 و100 خلية فقط، ويقل ذلك بنحو عشر مرات من السرطان المشخص في الخلية الخبيثة الأولى، كما أنه يفوق طريقتي (CT) و(MRI) حساسيةً في اكتشاف كتل الأورام التي تطورت إلى الحد الذي تكتشف به هاتين الطريقتين بآلاف أو ملايين المرات. وقام ناي ببناء مرشدات نانوية الحجم تضيء براقةً معلنة موقعها. وقام بعد ذلك بوضع جزيئات ذات انتقائية عالية على سطح هذه المرشدات تلتصق بخلايا السرطان فقط. واستطاع ناي بواسطة حقن هذه المرشدات في الفئران من رؤية

---

(2) X. Gao [et al.], «In Vivo Cancer Targeting and Imaging with Semiconductor Quantum Dots,» *Nature Biotechnology*, vol. 22, no. 8 (August 2004), pp. 969-976.

المواضع التي التصقت بها هذه المرشدات، وهي مواقع نمو السرطان.

وقام ناي بصب العديد من العناصر ذات التصميم الجزيئي في مرشداته، وتطلب الأمر أن تكون صغيرة بما فيه الكفاية لتنطلق بحرية في مجرى الدم، وهو مطلب دفعه لأن يبني هذه المجسات بقطر يبلغ نحو عشرة نانومترات. وكان كل مرشد من ذوي العشر نانومترات متعدد الطبقات بحد ذاته مثل الدمى الخشبية الروسية(*)، وتكون الدمية الخارجية هي الطعم بحيث تجعل المجس جذاباً للخلايا السرطانية ليغريها لتجمل أنفسها بسخاء بهذا الزي المبهرج للمرشد البراق، مثل الذهب على مطرقة الباب أو الجواريب البيضاء والأحذية ذات النعل الطبي المقدس عند الطالب الأكاديمي. وكان المرشد المنتج للضوء بشكل كرة قطرها 5 نانو في قلب المجس، وهي جسيمة متناهية الصغر من المادة بحيث تدعى نقطة كم. إن لون الضوء الذي تنتجه ونقاء هذا اللون سيكونان ذا أهمية فائقة، وسيتيح لها لون مميز أن ترى مقابل توهج غير مميز ينبعث من كل مادة الجسم التي ينيرها اللايزر. ويقوم ناي بهندسة نقاط الكم التي يستخدمها بطريقة لتعطي أشد درجات اللون الممكنة نقاءً وبذلك تبدو واضحة على خلفيتها.

وتحدد الذرات التي تشكل قطعة المادة اعتماداً على عالم فيزياء نيوتن الكلاسيكية لون الضوء الذي ينتج عنها بصورة كاملة. إنها الكيمياء لوحدها فقط وليس حجم الجسيمة الذي يقرر ذلك. إلا أن القواعد تختلف في عالم الكم على أي حال، فعندما يتم بناء أشياء

(*) الدمى الخشبية الروسية (Matryoshka Dolls): مجموعة دمى واحدة داخل الأخرى.

ذات حجم نانومتري يكون كل من المكونات الذرية وحجم وشكل الجسيمة ذا أهمية، فالإلكترونات التي تدور حول الذرات كانت الفيزياء الحديثة قد قالت قبل قرن تقريباً إنها موجات مندفعة من الاحتمالات. إننا نستطيع أن ننغم أطوال وترددات الإلكترونات مثل أوتار الغيتار بتغيير أطوالها. وهندس ناي جسيماته من خلال التحكم بحجم نقاط الكم ـ أي مرشداته ـ بحيث أعطت لوناً برتقالياً ـ أحمر متميزاً. وابتدع بهذه الطريقة تبايناً أتاح للبقعة البرتقالية البراقة من الجسيمات النانوية لكي تكون ملحوظة بسهولة على الخلفية غير المتميزة لتوهج الفأر ذاته.

وبدأ ناي بعد ذلك يربط جزيئات مصممة على الأسطح الخارجية لمرشداته. وكانت الطبقة الخارجية تلك التي تراها خلايا الفأر تتألف من بروتينات مهندسة جزيئياً لتلتصق فقط إلى خلايا خاصة، أي تلك الخلايا التي تظهر دلائل على كونها سرطانية. وكان باحثون سابقون قد اكتشفوا المفتاح الجزيئي الذي يطابق بصورة خاصة جيداً في إقفال على سطح خلايا سرطان البروستات لدى الإنسان. وقام ناي بتزيين مرشداته بهذه المادة ذات الزغب المختارة لكي تلتصق بخلايا السرطان. وسيعلن المرشد خلايا السرطان التي يجب اكتشافها فقط.

وكانت نقاط الكم والبروتينات اللصيقة مختلفة إحداها عن الأخرى، بحيث إن ناي اضطر إلى إيجاد طرق للصقهما سوية بطريقة آمنة.

قام أولاً بتغليف جسيماته النانوية بطبقة سميكة من الجزيئات التي تؤشر إلى الخارج من سطح الجسيمة شبه الموصلة: استخدام شعيرات نانوية لصنع كرة كم مكسوة بما يشبه الفراء. وكانت كل نهاية من الجزيئة مصممة لتلتصق بشدة إلى نقطة الكم بينما كانت

النهاية الأخرى تعمل على فصل النقاط عن بعضها البعض.

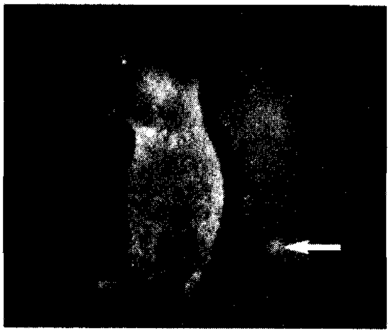
إن منع نقاط الكم من التكتل سوية مهم جداً، لأنها بذلك تفقد خصوصية إشعاع النور التي تميزها وهي خاصية تنبع من حجمها المصمم بدقة. أما الجزيئات التي استخدمت لوضع الغطاء الخارجي للنقاط فقد وفرت صدرية نجاة عازلة تساعد في الحفاظ على نقطة الكم عائمة ـ محلولة في مجرى الدم، وأيضاً للحفاظ بطريقة سليمة على الطاقة ضمن نقطة الكم التي ستحضن فيها لجعلها تنتج الضوء. إن بريق مجسات نقاط الكم ـ وبذلك سهولة اكتشاف خلايا السرطان بأقل عدد من تواجدها ـ يعتمد على تصميم وقوة هذه الجزيئات المغلفة. إن إمكانية رؤية نقاط باهتة على خلفية خواص انبعاث الضوء المتأصلة في النسيج الحي ستكون مثل محاولة تمييز بقعة بلون كريم الدراق على خلفية بلون قشرة البيض.

وكانت الخطوة التالية في تصميم ناي هي تثبيت شريطه ذي الوجهين اللاصقين الذي سيتيح له تزيين مرشداته في الجزيئات التي تتعرف على خلايا السرطان. واستخدم لهذا الغرض بوليمرات، وهي سلاسل جزيئية تتألف من عدد من الروابط لكي يضفي أكبر قدر من الالتصاقية على هذه الطبقة. وتطلّب الأمر من الباحثين تصميم عديد من نقاط التثبيت لطبقة البروتينات محددة الارتباط التي ستليها.

إن زيارة محطات الرسو يعني تخصيصاً أدق، فمرشدات ناي ستلتصق إلى خلايا السرطان ولا شيء غيرها، وستتألف الخلايا المهتمة بشدة فقط. ومع وضع الطبقة البروتينية النهائية بدأ ناي عمله ليبرهن على نجاح استراتيجيته. وقد بين أولاً في صحن تجارب مختبري أن مجسات نقاط الكم التي استخدمها التصقت إلى خلايا سرطان بروستات الإنسان فقط، فهو لم يعرض انتقائيه وقوة جزيئاته الباحثة عن السرطان والمصممة مسبقاً من خلال قيامه بربط مفتاح

معروف إلى سطح مرشداته، فمن خلال تقويس النصف الزغِب من المادة الملصوقة حول نقاط الكم ترك ناي الجزيئات لصيقةً وانتقائية.

وقام ناي بعد ذلك بإدخال المجسات في الفئران باستخدام إبرة لحقن مزيجه في شريان الذيل. وقام بتنوير الفئران لتزويد نقاط الكم بالقوة، معطياً الجسيمات النانوية الطاقة المطلوبة لتنتج التألق المميز. ونظر إلى عيناته مستخدماً آلة تصوير ومرشح يمرّر الألوان الخاصة بنقاط كمه فقط.



فأران، الأيسر يتمتع بالصحة في حين يعاني الأيمن من سرطان البروستات. ويشير السهم إلى موقع الضوء البرتقالي الساطع القادم من نقاط الكم التي التصقت على خلايا سرطان البروستات البشرية.
(بموافقة من مجلة *Nature*)

ونجحت التجربة، إذ تم الكشف عن خلايا السرطان، وانبعث ضوء برتقالي براق من الفأر المصاب وجاء الانبعاث من النقطة التي تم حقنه بها بخلايا سرطان البروستات الإنساني.

إذا أمكن نقل تجربة ناي إلى المرضى من البشر فإن ذلك سيعني تشخيصاً مبكراً للسرطان من دون جراحة أو تصوير للورم. وإذا ما كانت الجراحة ضرورية، فإن طريقة ناي يمكن أن تعمل كطريقة «حيّة» مستمرة لتصوير السرطان تحديداً خلال العملية، مما يسمح بإزالة الورم المتوهج.

لقد أعد ناي المسرح لتحسينات إضافية على تقنيته، فهو قد

اختار نوعاً من السرطان ذا قابلية واضحة للكشف، وهو سرطان البروستات، الذي يعلن عن نفسه بالتلويح بعلم قراصنة مفرد مميز على سطح الخلايا المصابة. لكن ذلك لا تفعله كافة أنواع السرطان، فالعديد منها تبدي مجموعة من الإشارات المميزة، وتتيح تجربة ناي للباحثين البحث عن هذه الإشارات. لقد صمم ناي مرشداته لتسمح لعدد قليل من المؤشرات لكي تربط إليها.

كذلك جعل مرشداته قابلة للتلوين لكي يستطيع تتبُّع أين تجمعت المجسات. وقد تتمكن مجسات متعددة المؤشرات يوماً ما بفتح أقفال توافقية لأنواع أكثر إبهاماً من السرطان.

وعندما تبرز الحاجة لتتبع عدد من المؤشرات المختلفة فإن عدد المرشدات التي نحتاج تمييزها بحيث يتجاوز عدد الألوان على لوحة ألواننا. لذا قام ناي باصطناع شفرة أعمدة (Barcode) ضوئية على المقياس النانوي(3)، وهي مجموعة من لافتات ضوئية معقدة متعددة الألوان تحوي عدداً من نقاط الكم. وقام بهذه الطريقة بتوسيع مكتبة الشفرات من عشرة إلى مئة ألف. ويمكن بهذه الواسطة اقتناص مئة ألف نوع مختلف من مؤشرات خلايا السرطان على سطح الخلايا. تصور أن المسح يمكن أن يجرى لسرطانات البروستات والكبد والثدي والرئة في اختبار واحد. يمكن أن يكون جزءاً من الكشف الصحي السنوي للشخص، وبذلك لن تتاح لخلايا السرطان فرصة البقاء سبع سنوات لتعيث في أجسامنا فساداً.

ورغم أن التقدم الذي حققه ناي كان لافتاً للنظر، إلا أن

(3) Mingyong Han [et al.], «Quantum Dot-Tagged Microbeads for Multiplexed Optical Coding of Biomolecules,» *Nature Biotechnology*, vol. 19 (July 2001), pp. 631-635.

الكشف المبكر عن المرض باستخدام نقاط الكم مازال يواجه تحديات مهمة، فمرشداته استخدمت نقاط كم مصنوعة من سيلنيد الكادميوم شبه الموصل، وهو مادة يمكن أن تكون سامة للخلايا وخاصة إذا ما تمت إنارتها باستخدام إضاءة شديدة. لكن على الجانب الإيجابي توفر طبقة البوليمر الحافظة التي أضافها ناي عزلاً عن مجرى الدم. وليس من المعروف على وجه الدقة أين ستنتهي المرشدات داخل جسم الإنسان. الحالة المثالية هي أن يتم التخلص من النقاط المحمية جيداً خارج الجسم عن طريق الكليتين. لكن قضية السمية الممكنة يجب أن يتم التصدي لها وجهاً لوجه قبل أن يبدأ التفكير باستخدام نقاط الكم على المجال البشري. وسيكون هذا عائقاً رئيسياً يجب تخطيه وذلك لطمأنة الباحثين أولاً حول سلامة نقاط الكم ومن ثم لكسب ثقة الأطباء والمرضى.

إن الأهمية الأوسع للعمل قد لا تعتمد على أي حال البرهان على عدم سمية نقاط الكم، فقد أظهرت بحوث ناي عند التوسع فيها أن مرشداً متألقاً يمكن أن ينير خلايا السرطان داخل الجسم، والبحث مستمر عن مرشدات أفضل وطرق أفضل لربط طبقات المرشد. لكن حتى ولو عثرنا على مرشد سليم وكفوء، فإن رؤية السرطان في الفئران لا يعني أننا سنستطيع رؤيته عند الإنسان، فأعضاؤنا تقبع مختبئة تحت طبقات سميكة من الأنسجة التي يكاد الضوء المرئي يخترقها، فالنور من عدد قليل من نقاط الكم التي تدور في تيار الدم سيكون واهناً، وستجعل طبقةٌ من الأنسجة الماصة التقاط وتمييز الأورام العميقة داخل الجسم بينها وبين آلة التصوير مستحيلاً.

ومع ذلك فإن الحل موجود، فالضوء في المنطقة تحت الحمراء ـ وهو ضوء غير مرئي بالنسبة لنا رغم كونه بنفس واقعية وقوة الضوء

المرئي - يتغلغل بصورة أفضل خلال الأنسجة. وتتوفر أجهزة التصوير والمرشحات للأشعة تحت الحمراء كما هي متوفرة للنور المرئي.

وقد أظهر فريق من كلية الطب في جامعة هارفارد ومعهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا أن المرشدات التي تتألق بواسطة الأشعة تحت الحمراء يمكن استخدامها لروية العقد اللمفية للفئران والخنازير أثناء الجراحة، فقد قام الجراحون تقودهم آلات التصوير تحت الحمراء بإزالة كاملة للعقد اللمفية المعلمة بنقاط الكم وكانوا قانعين بنجاح عمليتهم قبل أن ينتهوا منها. لكن نقاط الكم تحت الحمراء من هذا النوع فقدت على أي حال خاصية بعث النور بسرعة كبيرة واعتمدت كمرشدات ضوئية. وقد أعلنت مجموعة البحوث التابعة لي في جامعة تورنتو مؤخراً[4] إمكانية بناء مرشدات في المنطقة تحت الحمراء تحتفظ بتألقها في بلازما الدم عبر أيام وأسابيع، فقد قمنا ببناء جسيمات مباشرة على الجزيئة الحيوية، أي الـ «دي. أن. آي.» المأخوذ من عجل وذلك لوقاية الجسيمات شبه الموصلة داخل المغلف الجزيئي، فقد توهجت الجسيمات متألقة وبقيت متألقة في دم بحرارة الجسم.

وقد نجحنا من خلال استخدام بنية جزيئات الـ «دي. أن. آي.» لبرمجة نمو الجسيمات النانوية من الحجم المطلوب بالضبط في إنتاج ضوء يتدفق عميقاً في الأنسجة الحية.

ويجب الآن الجمع بين كل هذه الاختراقات، فكل فريق قد تمكن من اختراق أحد الحدود التقليدية التي تشطر البحوث إلى

(4) Larissa Levina [et al.], «Efficient Infrared Emitting PbS Quantum Dots Grown on DNA and Stable in Aqueous and Blood Plasma,» *Advanced Materials* (2005).

كيمياء وفيزياء وبيولوجيا وهندسة. ويجب على فرق تقيم جسراً بين العلوم الصرفة والهندسة والطب أن تحول هذه الاكتشافات الأساسية بواسطة الأدوات الهندسية إلى المسرح العملي.

وربما تتضمن زيارة إلى الطبيب يوماً ما ابتلاع حبة تحوي أضوية شجرة عيد ميلاد معلَّمة لونياً لا تلتصق إلا بالخلايا الخائنة في الرطانات الوليدة ضمن البروستات أو المرئي أو الدماغ. وسيتمكن الجراحون من التأكد من أنهم أزالوا الأورام الناشئة بصورة كلية ومن دون الحاجة لإزالة أجزاء مجاورة من الأنسجة المحيطة. ومن خلال هذا التشخيص المبكر يمكننا تصور عالم لا نعطي السرطان فيه الوقت ليتفشى.

الترتيب ضمن الخلايا: تنظيف الربيع الجزيئي

تضع مرشدات شومينغ ناي الجزيئية مجسات ذات حجم نانوي في جسم المريض. لكن قراءة هذه المجسات واستخلاص النتائج يحدث خارج جسم المريض، خلال تجميعه من اللايزرات وآلات التصوير والحواسيب. ويتطلب الأمر لكي نضيف إلى مجموعة الأمراض التي يمكن تشخيصها ـ أنواع جديدة من السرطان أو الأمراض الجينية، مثل تليف الحرارة ـ تطوير مجسات جديدة بأسطح ذات انتقائية في الالتصاق.

وهناك أسلوب آخر يتم تطويره: ضع المختبر داخل المريض، فالرقاقات الحيوية والتي تعرف أيضاً باسم مختبر ـ على ـ الرقاقة قد تدخل يوماً في جسم المرضى وتستوطن داخله بدل أن تبقى في الخارج وتراقب وقد تكتّف. ويمكن للرقاقات الحيوية، مثلها رقاقات الحاسوب، تأدية ملايين التجارب الدقيقة في لمح البصر.

لكن تداول هذه الرقاقات الحيوية ـ بخلاف رقاقات السيليكون

ـ ليس محدداً ضمن نوعية واحدة، فتدفّق الإلكترونات يمثل معلومات رقمية، فهي تتعامل بدل ذلك مع الخلايا وما في داخلها، أي مع آلات البروتين التي تيسر حدوث الحياة، ومع الشفرة الجينية للـ «دي. أن. آي.» التي تحوي تعليمات التجميع لآليات الحياة.

وتتجاوز الرقاقات الحيوية العالم الإسبارطي التجريدي غير العضوي للمنطق الرقمي الخالص، معززة إياه بالدواخل السائلة للخلايا، أي بالحياة الرطبة العضوية المنسابة زلقة على رقاقة منطقية: إنه زواج الجمال مع الذكاء.

وتتيح لنا الرقاقات الحيوية دمج الأداء الضيق لكنه باهر للاحتساب مع أناقة وتنوع الحياة. ويوفر لنا الاتحاد طرق جديدة لتفهّم ماذا يجري داخل أجسامنا، فالحياة معقدة وفي أوجه غير مفهومة تشمل عوالم الحجم: ذرات دون القياس النانومتري وبروتينات بحجم عدة نانومترات وجزيئات «دي. أن. آي.» طويلة لكنها ضيقة، وخلايا بقياس مايكرومتري ومستعمرات وأعضاء وأناس من حجم دون المليمتر إلى عدة أمتار. وتشكل العلاقات بين هذه الأطوال سلسلة هرمية لا يمكن للحياة كما نعرفها أن تعمل من دونها، فإذا لم تبن كل طبقة منها على التالية فنكون تعقيداً من الفطريات وسيكون إحساسنا شبيهاً بالكمأة، فنقاط الكم تلامس طبقة أو طبقتين في هذه السلسلة ـ ملتصقة بالبروتينات التي تكشف عن السرطان المتجمع في عناقيد بحجم ورم. ويمكن للرقاقات الحيوية أن تعبر مسافات أبعد ذات أهمية في حالة المرض.

والقياس النانومتري ذو أهمية من دون شك: وما الذي حدث في جيناتنا وأدى إلى السرطان؟ وكيف تأثرت البروتينات؟ والأسئلة على مقياس أكبر ذات أهمية أيضاً. هل يمكن هندسة فيروس ذي بعد

100 نانومتر ليحارب بانتقائية الخلايا المذنبة؟ كيف يمكن لبيئة الخلية ـ بما في ذلك مجمّع الخلايا المحيطة ـ أن تولّد الوطأة المؤدية إلى السلوك السلبي؟ هل يمكن للخلايا المخطئة إصلاح سلوكها إذا ما وضعت ضمن جمع سليم؟ وستتمكن الرقاقات الحيوية من أخذنا إلى مسافة أقرب للنظر إلى هذه التفاعلات ـ وإلى العلاج للعلل التي قد تنشأ عنها.

ويدرس بيولوجيو الأنظمة العلاقات بين التفاصيل على الحجم النانومتري وفعالياتنا من يوم لآخر. كيف يمكن أن تسبب الجينات والبروتينات السعال والتهيج الجنسي وسكب القهوة وانحناء الوركين؟ لو استطعنا فهم كيفية تطور الواقع الإنساني من كيمياء الجزيئات فربما سنكون قادرين على التحكم بقدرنا، كأن نهندس غريتا غاربو محسّنة، أو أن نُخضع السرطان، أو أن نتحكّم بالكآبة، أو أن نتغلب على الشيخوخة أو نبطئها على الأقل. وربما نستطيع جعل بشرتنا تحوّل ضياء الشمس إلى سكريات، أو أن تستهلك أجفاننا غازات الدفيئة الخطيرة.

أما بيولوجيو الأنظمة التجريبيون، فيأخذهم الخيال إلى أداء تجارب تساعدنا على تفهُّم كيفية بروز الوظيفة من البنية. تصور ما الذي يمكن أن نرغب فعله لنعرف كيف يمكن لعدد من الجزيئات المومئة ضمن فئة محدودة من الخلايا أن تؤثر على مصير الخلايا. وكيف تبرمج البروتينات المختلفة الخلايا لتسترخي أو تتكاثر أو تموت؟ إن الجواب يعتمد على المرحلة العمرية للخلية، إذا كانت في شبابها أو بلوغها، أو في فترة أبوتها أو كهولتها أو عجزها. وستقرر البروتينات أيضاً المرحلة الحياتية في عمر الخلية.

وهذا مثال لحلقات التغذية الراجعة العَرَضية التي تدور حول بعضها.

وكل هذه المتغيرات بحاجة إلى عدد كبير من التجارب، فيجب تجنيد عدد ضخم من عينات أفراد ذوي خلايا وإجراء مقابلات معهم حول أكثر عاداتهم الشخصية الحميمة. ويجب وضع خلايا متماثلة في حجرات منفصلة لدراستها فردياً. وسيتم تجهيز كل حجرة بشبكة شخصية لمراقبة عادات كل خلية. ويطالب بيولوجيو الأنظمة بمشاهدة المكائد التي تجري على المستوى النانومتري والتي ينجم عنها انعطافات لمكائد جديدة في جزء من تريليون من الثانية. إن التذاذهم باختلاس النظر لا يعرف حدوداً، فتفاصيل السوائل التي تفرز كاستجابة (لفعل ما) تدغدغ حواسهم. واهتمامهم بتكاثر الخلايا أمر مسل. وعينات سوائل الخلايا ليست بالسخية، فكل واحدة تحوي واحد من تريليون من الكوارت(*) (Quart) من السائل. وليس من المغالاة في شيء أن نطلب من الخلايا التبرع بواحد في الألف من هذا المقدار لغرض البحث العلمي. ويقوم تقنيو النانو بتحليل فيمتوليتر(**) (Femtolitre) من هذه المواد اللزجة بنجاح.

والبيولوجيا لست كيمياء لوحدها، إنها معمارية وهندسة ميكانيكية أيضاً. وتعزو مجموعة من بيولوجيي الخلية أهمية فائقة إلى دور الإجهاد (أو الشد) والانضغاط في جدار وهيكل الخلية. وهذه تعطي الخلية بنيتها وتربطها إلى جيرانها. ويقوم بيولوجيو الخلية بلكز ونخس خلاياهم مستخدمين أسلة مجاهر القوة الذرية لديهم لدراسة كيفية تصرف الخلايا عندما يصل مستوى الدفع حداً كبيراً. ويتطلب الأمر من المجموعة التي تعمل على المختبر ـ على ـ رقاقة إجراء

(*) الكوارت (أو ربع الغالون): مقياس إنجليزي لحجم السائل يساوي ما يوازي الليتر تقريباً.

(**) الفيمتوليتر يساوي 10 ـ 15 من الليتر أو جزء من ألف مليون مليون جزء من الليتر.

ملايين من مثل هذه الغرف حيث يجري استجواب التحفيز ـ الاستجابة المتحكم به، وذلك لمشاهدة رد فعل الخلية لروتين الشرطي الصالح ـ الشرطي الفاسد.

إن الأرضية الواجب استكشافها ضمن كل خلية واسعة جداً في الحقيقة. تصور مجموعة من العلماء بالغي الصغر يرتدون صدريات مختبرية ذات حجم نانومتري ويستخدمون حقناً بحجم نانومتري أيضاً يؤدون مجموعة من الاختبارات النظامية ويرسلون المعلومات إلى قصر عام رئيسي. المطلوب في بحث علمي من هذا النوع أن يكون مُؤَتْمَتاً وأن ينظم ملايين المهمات المكررة. مثل هذا العمل يصرخ طالباً قوة وأداء الحواسيب. ويعتنق بيولوجيو الأنظمة النانوية وضع المختبرات على رقاقة لتعمل على مدار الساعة لتساعدهم على فك ما تبقى من أسرار الحياة بطريقة منتظمة.

الربط بين الرقاقة والحياة والناس

تربط المختبرات على الرقاقات والمسابر النانومترية المنطقي والبيولوجي ـ الاحتسابي والحسي أو الجاف والرطب. إنها تفتح سبلاً لاستخدام لأقوى آليات التحليل التي ابتكرها الإنسان إلى أشد الأنظمة الفاتنة تعقيداً، ألا وهو الكائن الحي. ومع اكتشاف تسلسل توالي الجينوم البشري قمنا بقراءة سلسلة الأحرف التي تؤلف كتاب الحياة، لكننا لا نعرف إلا القليل مما يعنيه، فنحن في أولى مراحل فك شفرة الحياة.

فعندما نفهم فعلاً وبالتفصيل كيف ولماذا نعمل سنكون بدون شك قادرين على التدخل. وهناك على الأقل بُعدين للمستقبل الأخلاقي للبيولوجيا كما تفهم جيداً من القعر صعوداً: ماذا نفعل بالمعلومات وماذا نعمل بقوتنا المكتسبة حديثاً للتأثير على التغيير؟

بالنسبة لقضية المعلومات إذا ما استطاعت نقاط الكم والمختبرات ـ على ـ الرقاقة وأي شيء آخر تعطينا إياه التكنولوجيا النانوية مراقبة وتصنيف الخلايا حسب أمراضها، ومن ثم إرسال التقرير ـ لنقل عبر شبكة لاسلكية ـ فإلى من سيرسل هذا التقرير؟ افتراضياً سيكون ذلك إلى طبيبك. لكن شركة تأمينك أيضاً قد تود أن تعلم عن تغيرات الصباح الباكر التي قد تصيبك.

وإذا ما استطعنا التدخل في بيولوجيتنا فأين سننتهي؟ إذا كان بمقدورنا إنقاذ مرضى السرطان وإطالة فترة ونوعية حياتهم، فسوف لا نتردد في علم أي مطلوب لهذا الهدف. وما الذي سنكون مستعدين لعمله من غير ذلك، وبخاصة أن من المحتمل ورود إمكانيات أكثر غموضاً أمامنا قبل معالجة أمراض معقدة ومروعة؟ كم يجب أن يكون طول الطفل الجديد المتوقع قبل أن يتحول وضع اجتماعي غير مؤات ليصبح عوقاً؟ هل ستكون عقفة الأنف المبرمجة جينياً قابلة للإنزال من شبكة لاسلكية؟ إننا نتدخل اليوم بغزارة في مجريات الحياة بطريقة نبيلة ومن دون أي تحفظ. وستزيد التكنولوجيا النانوية من قدرتنا على تغيير مجريات الحياة. وستحمل قوانا الجديدة معها مسؤوليات جديدة. وسنعتمد بالنسبة إلى هذا على مشيتنا وأخلاقياتنا الفردية والجماعية، وهما مجالان يتمكن العلميون فيهما من توفير المعلومات حول إمكانياتنا المتعاظمة، إنما يقع على المواطنين عبء إضافة قرارهم.

الفصل الثاني

الشـــفـاء

إن رؤية السرطان عندما تفسد أولى الخلايا يوفر لنا أفضل نظام إنذار ـ أولي يمكن تصوره. لكن ما الذي سنفعله بالتحذير المبكر؟ إن التكنولوجيا النانوية ستتيح لنا التصرف بناء على هذه المعلومات وعلى عمل ذلك بدقة وباستراتيجية.

تعطي طريقة العلاج الكيميائي للسرطان اليوم مثالاً للافتقاد إلى التركيز والتحكم الموجودين اليوم في طرق إيصال الأدوية حيث ومتى تبرز الحاجة لها. إن أساليب العلاج التقليدية لا تهاجم الخلايا في منطقة الورم فقط، بل تهاجم الخلايا في جميع المواضع، فالعلاج الكيميائي ـ بخلاف أنواع العلاجات الأخرى كالإشعاع الذي يركز على مناطق الورم المحددة ـ ينفذ إلى جسم المريض برمته، وهو ليس بذلك الشبيه بالقنابل الذكية المسددة إلى هدف محدد، بل أشبه بالقصف البساطي (Carpet Bombing) بكل الأذى المصاحب له: الشعر يتساقط، وتفقد الأظافر، ويعاني المريض اختلاطات معوية.

الأمر الثاني هو أن العلاج الكيميائي التقليدي لا يبحث عن خلايا معينة ـ وهي في الحالة المثالية خلايا السرطان ـ لكي يفعل

تأثيراته السمية، فهو يستهدف الخلايا سريعة الانقسام، وهذا على وجه التأكيد يشمل الخلايا السرطانية، لكنه يشمل أيضاً الخلايا التي تنتج الشعر وتمكن النظام المعوي من أداء فعالياته الطبيعية.

الأمر الثالث هو أن الكيميائيات اليوم تتطلب حقناً من الدواء تعطى على فترات، حيث تتلاشى بعد ذلك تدريجياً عبر فترة من الزمن وحتى يحين موعد الحقنة التالية.

إن ما يقرر فعالية الدواء هو تركيزه في مجرى الدم عبر فترة زمنية. ولا تتيح طرق إيصال الدواء التقليدية لنا ذلك التحكم الدقيق على هذه الواجهة الحاسمة للعلاج. دعنا نفكر لبرهة بالبديل الممكن: هل يمكننا بناء نظام لإيصال الدواء يستشعر أين ومتى هي الحاجة للدواء في جسم المريض ولإيصال جزيئات الدواء بناء على ذلك؟ إن أدلتنا حول الموضع الذي ينزل فيه المرض وحول النوعية التي سيتخذها بالضبط ستكون من النوع الجزيئي. وتمتلك التكنولوجيا النانوية التي ستشعر وتعمل على المقياس الجزيئي دوراً لتؤديه في هذا المجال.

التحكم في توقيت وموقع إيصال الدواء

يعتبر الأستاذ بوب لانغر (Bob Langer) من معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا أسطورةً، ليس في المحافل البحثية وحسب بل بحسّه التجاري أيضاً، فقد أخذ بابتكارات التكنولوجيا النانوية من المختبر إلى المريض، وهو يحتفظ بأربعمائة براءة اختراع مرخصة لثمانين شركة، وهناك ثلاثون منتوجاً متيسراً في الأسواق أو تدور في دواليب الموافقة لوكالة الغذاء والدواء قدمت في الأصل من تكنولوجيات طورت في مختبراته.

وتحيط العديد من ابتكاراته بطريقة إيصال الدواء حيث ومتى

تبرز الحاجة له، وينصب معظم عمله على علاج السرطان، فإيصال الدواء موقعياً له فوائد هائلة في علاج أنواع محددة من السرطان في مراحل خاصة. ولما كانت أدوية السرطان سامة، فإن إمكانية إيصالها موقعياً لتهاجم الخلايا المصابة فقط بدل انتشارها في كافة أنحاء الجسم، مستخدمين تقنيات لانغر، سيقلل من آثارها الجانبية بصورة ملفتة للنظر. ويمكن في الوقت ذاته أن تزاد كفاءة أدوية السرطان، لأن تركيز الأدوية القاتلة الكافي لقتل المريض إذا ما أعطي خلال الجسم كله يمكن الآن أن يوصل إلى الورم السرطاني مباشرة.

وهناك الآن على الأقل سبعة عشر نظاماً لإيصال الأدوية موقعياً قيد الاستخدام، وذلك لعلاج أنواع مختلفة من الأمراض، ومنها سرطان البروستات المتقدم والأورام الدماغية واللوكيميا. وتستخدم أنظمة إيصال الدواء من هذا النوع من قبل مئات الآلاف من المرضى سنوياً. وتمثل لصقات عبر الجلد من مواد لإيقاف التدخين (من نوع نيكوديرم (Nicoderm) وهابيترول (Habitrol)) أنظمة بسيطة أخرى لأنظمة الإيصال التي تتحكم بإطلاق الدواء عبر الزمن. ويستخدم إيصال الدواء عبر الجلد أيضاً لتخفيف الألم لدى مرضى السرطان بوتيرة مستمرة.

وكان لانغر مع جودا فولكمان (Judah Folkman) في جامعة هارفارد قد قام في السبعينيات بالتصدي لواحد من أوائل التحديات في مسألة إيصال الدواء بمعدل ثابت وبطيء عبر الزمن، فواحدة من مشاكل إيصال الأدوية في فترات محددة بواسطة الحبوب أو الحقن هي أن جزيئات الدواء تتلاشى بسرعة داخل جسم المريض. ويعتبر ثبات مستوى تركيز الدواء بالنسبة لعديد من طريق العلاج أكثر الطرق السريرية كفاءة، ورغم ذلك فإن مستوى الدواء في مجرى دم المريض ليس منتظماً عبر الزمن. وكان لانغر وغيره يعملون على

طرق كانت جزيئات الدواء فيها تحتجز في رقاقات مصنوعة من البوليمرات، وهي تلك الجزيئات الطويلة التكرارية التي تصنع منها اللدائن ومطاط الإطارات الصناعي، وهي كذلك أساس الكاربوهيدرات في الغذاء. وكان طمر الجزيئات داخل هذه المواد الصلبة بدل حقن هذه الجزيئات الحرة في الدم يساعد على إبطاء إطلاقها إلى المريض. وبهذه الطريقة كانت جزيئات الدواء ترشح ببطء وبطريقة متحكم بها عبر الزمن. لكن المشكلة برزت عندما أريد استخدامها مع بعض العقاقير ذات الجزيئات الكبيرة، إذ إن الدواء لم يهرب بتاتاً أي إنه ببساطة لا يتزحزح من موضع طمره. وقام لانغر وفولكمان باستنباط طرق كيميائية جديدة لوضع الدواء في شبكة من البوليمرات شبيهة بالإسفنج تحوي ثقوباً ذات حجم يماثل الجزيئة. وتسير جزيئات الدواء في شبكة من الثقوب المتصلة ببعضها مثل حيوان الخلد الذي يعيش في شبكة من الأنفاق المتصلة ببعضها أيضاً تحت الأرض. وقام الباحثون بالتحكم في حجم الثقوب، وبذلك على سرعة إطلاق الدواء، ومكّنهم ذلك من تحديد زمن إطلاق يستمر ما بين بضعة أيام وبين سنين، وذلك من خلال تصغير حجم الثقوب إلى المقياس الجزيئي. وتستخدم هذه الأنظمة اليوم لمعالجة سرطان البروستات المتقدم. وتدوم المُزْدَرَعة من شهر إلى أربعة أشهر بعد إعطائها إلى المريض.

ويمكن استخدام وسائل الإيصال من ابتكار لانغر للتحكم في الإطلاق ليس بموجب الزمن فقط بل حسب الموقع وبذلك نجلب الدواء إلى أجزاء مختلفة من الجسم. إن التأثيرات الجانبية للعلاج الكيميائي تبرز من حقيقة أن أدوية السرطان تقتل العديد من الخلايا وليس الخلايا الخبيثة فقط، لذا يتم إعطاؤها بجرعة أقل تركيزاً من تلك المطلوبة لقتل خلايا السرطان، لكي لا تقتل المريض. ولكي

نجعل أدوية السرطان أكثر فاعلية وأسلم يجب أن نوصل الدواء بتركيز أعلى لكن في موقع المرض. ويستخدم مثل هذا الأسلوب الآن في علاج سرطان الدماغ.

يقوم الجراح عادة بإزالة أكبر قدر ممكن من الورم خلال العملية ثم يقوم بوضع رقاقات صغيرة من الأدوية البوليمرية بطيئة الإطلاق على سطح الدماغ في موضع الورم كبطانة للتجويف الدماغي. وكان 31 في المئة من مرضى سرطان الدماغ الذين عولجوا بهذا الأسلوب في إحدى التجارب السريرية لايزالون أحياء بعد سنتين بينما نجا 6 في المئة فقط من مرضى سرطان الدماغ الذين تلقوا علاجاً تقليدياً. وقامت وكالة الغذاء والدواء بالموافقة على هذا الأسلوب سنة 1996.

وقد استخدمت جزيئات البوليمر المصممة أيضاً لإيصال الأدوية إلى حيث يوجد الطلب عليها لكن خلال مجرى الدم. وتستغل الطريقة التفضيل الخاص في أنسجة الأورام لجزيئات ذات حجم محدد، إذ تكون شعيرات الدم في الأورام من النوع الذي يسرب السوائل بينما تغذى الأنسجة المتمتعة بالصحة بشعيرات دموية صحيحة البنية لا تسرب السوائل.

وتتمكن الجزيئات الصغيرة المستخدمة في العلاج الكيميائي التقليدي أن تعبر خلال جدران الأوعية الدموية، أكانت صحيحة أو من النوع المسرب، من دون أي تفضيل للأنسجة المتمتعة بالصحة مقابل تلك السرطانية. أما البوليمرات ذات الجزيئات الأكبر بكثير التي كان بالإمكان ربط الأدوية المهاجمة للسرطان عليها، فترشح خلال جدران الأوعية المسربة التي تغذي الأورام وتبتلعها عند ذلك الخلايا السرطانية بطريقة انتقائية.

وهناك فائدة أخرى لربط أدوية السرطان إلى الجزيئات الكبيرة،

فالأدوية تبقى في مجرى الدم لمدد أطول، بحيث تمدد الفترة التي يكون العلاج المستهدف فعالاً خلالها. وهذه الطريقة لاستهداف الأنسجة السرطانية ذات فعالية مدهشة، فقد وجد الباحثون أن تركيز أدوية السرطان المربوطة بالبوليمرات كان يفوق في خلايا السرطان في جلد الفئران تركيزه في الخلايا العادية بسبعين مرة.

ووجد الباحثون أن الفئران تحملت جرعات من الأدوية المعلقة بالبوليمرات تفوق الجرعات من الأدوية التقليدية بعشر مرات، وذلك بسبب قلة تراكمها في الأنسجة الصحيحة. وكانت عشرة أنظمة مختلفة من هذه الأدوية البوليمرية تخضع سنة 2003 إلى تجارب سريرية على مرضى من البشر.

ويمكن لفكرة قنابل الأدوية الذكية أن تكون أكثر حرفيةً، فالليبوزوم (Liposome) هي فقاعة أو حويصلة يمكن ملؤها بحمل من الأدوية التي يتم حملها خلال مجرى الدم نحو الهدف ويبلغ قطرها نحو 100 نانومتر وتقوم باقتناص الدواء داخلها لتحمله بطريقة أمينة.

هذه هي القنبلة، فماذا عن الذكاء؟

يمكن أن نزين الليبوزوم بجزيئات تلتصق انتقائياً إلى معلمات تتواجد على سطح خلايا السرطان وهذه المعلمات هي بروتينات تعرفها الخلايا عندما تتحول إلى نوع خبيث. لذا تلتصق هذه الفقاعات إلى خلايا السرطان، وعند هذه المرحلة يندمج جدار الليبوزوم من خلية السرطان ذات الحجم الأكبر جداً. ويفرغ الليبوزوم محتوياته ضمن الخلية المستهدفة حاقناً جرعة ضخمة من الدواء. وقد تمت الموافقة على استخدام الليبوزوم لمعالجة سرطان كابوزي (Kaposi Sarcoma) ذي العلاقة بمرض الإيدز.

وعلى قنابل الليبوزوم الذكية أن تتجاوز نظام الدفاع الصاروخي

المبني في الجسم، فكل منا يمتلك خلايا تقوم بتنظيف مجرى الدم من أي جسيمات غريبة، لذا فإنها تقوم بتحييد فقاعات الليبوزوم. ورغم أن هذا النظام ذو مهمة مفيدة في حمايتنا ضد الغزاة، إلا أن تعامله مع الليبوزوم سيمنعه من إيصال القنابل الذكية إلى أهدافها، لذا قام الباحثون بإضافة جزيئات إلى سطح فقاعات الليبوزوم لوقايتها من الهجوم الذي قد تتعرض له من قبل الخلايا التي قد تعطلها.

ويحاول العلماء أيضاً أن يكتشفوا كيفية تعطيل خلايا السرطان من خلال قطع تجهيز الخلية بالغذاء، فعند تكوُّن الورم تنمو أوعية دموية جديدة لتجهيزه بالدم. وهناك هورمون في أجسامنا يساعد في نمو هذه الأوعية.

وقد تم تطوير عقاقير لكبح الأوعية الدموية الجديدة، وقام نظام إيصال أدوية محوَّر بزيادة فعالية هذه الأدوية، فعند حقن الأدوية مباشرة في مجرى الدم لن يكون لها ذلك التأثير، لكن عند حقنها مستخدمين البوليمرات ذات نظام الإطلاق طويل المدى فسيكون لها تأثير جيد. وقد زادت هذه الأدوية من فرصة البقاء لمن يعانون من سرطان القولون عندما استُخدمت مع نظام الإيصال بواسطة البوليمرات المدمج مع العلاج الكيمائي. أما أسلوب إيصال الدواء المتحكَّم به من خلال إسفنجيات جزيئية مهندسة، فقد برهن على كفاءته في المختبر وفي التجارب السريرية وفي العديد من المرضى.

إن تفوق هذه الطرق على الطرق التقليدية برهان على الأهمية الحاسمة للتحكم في إيصال الدواء زماناً ومكاناً. وتوجد مع ذلك مشاكل من نوع خاص لا تتمكن طرق التعليق الكيميائي هذه لوحدها من التغلب عليها، وأحد هذه المشاكل هي إيصال المعالجة إلى مركز كتلة صلبة من الورم، وهو نسيج يفتقر إلى وصول الدم بصورة جيدة. وهكذا، فإن الأدوية لن تصل إليه وحدها بسهولة. والصنف

الآخر من الأدوية الذي لا يتماشى مع الطرق التي ذكرت هي تلك التي تصبح ذات تأثير أقل عندما ترتبط كيميائياً مع جزيئة بوليمر كبيرة. لكن النجاح الباهر للإطلاق المسيطر عليه قام عندما ووجه بهذه التحديات بتحفيز الباحثين لمتابعة طرق جديدة للتحكم بكيفية إيصال الدواء.

التحكم بإطلاق الدواء باستخدام الرقاقات المايكروية المزدرعة

بيَّن الباحثون مؤخراً أن بإمكانهم استخدام الإشارات الكهربائية الصادرة من رقاقات مايكروية لتحفيز إطلاق العقاقير. ويمكن بهذه الواسطة إيصال (كوكتيل) من الأدوية بجرعات مضبوطة وتتابُع زمني تحكمه دقة رقاقة حاسوبية. وقد دعي هذا الأسلوب «الصيدلية ـ على ـ الرقاقة».

ويتضمن هذا المفهوم وضع خزانات على الرقاقة يحوي كل منها مقداراً معيناً من الدواء. وكانت النماذج الريادية للصيدلية ـ على ـ الرقاقة تبرمج قبل ازدراعها، حيث يثبت جدول الإيصال خارج جسم المريض. ويمكن في المستقبل أن يتم تنظيمها باستخدام إشارات تحكُّم ترسل من خارج جسم المريض، يتم إنزالها بواسطة حاسوب في يد الطبيب مثلاً، أو أن تبرمج بواسطة هاتف الصيدلي الخلوي.

وقد يحتفظ كل منا بتشكيلة قياسية من العقاقير مزدرعة تحوي مؤونة سنة مع سلسلة من المضادات الحيوية الاعتيادية ومضادات الحساسية معبأة فيها. إن أمن شبكة الاتصالات التي تبرمج هذه الرقاقات سيصبح عندما يحمل كل منا في جسمه حملاً قاتلاً من العقاقير ذا أهمية فائقة تتجاوز أهمية أمنها في الوقت الحالي.

ويمكن أن يحسن التحكم من الخارج بواسطة التحكم من

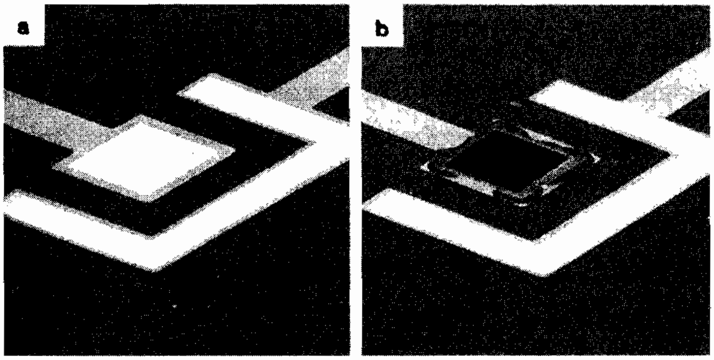
الداخل. تصور نظاماً ذا تحكم ذاتي لإيصال الأنسولين يقوم بتحسس مستوى السكر في الدم وكيفية تغيره مع مرور الوقت ويقوم بإطلاق جرعات ضئيلة من الأنسولين في جسم المصابين بداء السكر بصورة فورية وحسب الحاجة. وبدلاً من التعامل بصورة منفصلة مع قياس الكيميائيات في الدم والاستجابة العلاجية سيمكن بناء دورات تغذية راجعة للتحسس والتفعيل تدعم طريقة العمل الطبيعية للتحفيز بالاستجابة حسب الحاجة.

إن إيصال تشكيلة من الأدوية بتحكم قابل للبرمجة عبر فترة إطلاقها ملائم أيضاً لعلاجات توافقية، ففي علاج السرطان سيقوم الدواء الأول بإيقاف تزويد الورم بالدم من خلال منع نمو الشعيرات الدموية التي تغذيه. وسيلي العلاج الكيميائي ذلك للقضاء على ما تبقّى من خلايا الورم، وسيتم بعد ذلك إبقاء المريض خاضعاً لعلاج مستديم واطئ المستوى مصمم لمنع نمو شعيرات دموية جديدة في منطقة الورم. إنه توالي محدد للضربات 1-2-3 للحصول على الحد الأعلى للتأثير.

وقد أعلن بوب لانغر في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا (MIT) وهو يعمل مع الأستاذ مايكل سيما (Michael Cima) عن نجاح جديد في إطلاق الدواء المتحكم به سنة 1999[1]، فقد بنوا رقاقة سيليكون مايكروية تقوم إذا ما ازدُرِعت في مريض بإطلاق تشكيلة من العقاقير حسب الطلب. قاموا أولاً ببناء عدد من المستودعات المفردة، وملؤوا كلاً منها بسوائل ستكوّن في رقاقة إيصال الدواء المستقبلية العقاقير التي سيتم إطلاقها. وقاموا أخيراً

(1) J. T. Santini, Jr., M. J. Cima and R. Langer, «A Controlled - Release Micro-chip,» *Nature*, vol. 397 (20 July 1999), pp. 335-338.

بتغطية كل منها بغشاء رقيق سينحل فقط عند تسليط إشارة كهربائية. ولم تمتلك هذه الوسائل أي أجزاء ميكانيكية وكانت سهلة البناء (انظر شكل الرقاقة في الصورة).



رفع الغشاء الذهبي ينجم عنه انبعاث من الخزان.
خط القياس طوله 50 مايكروميتراً
(بموافقة من مجلة *Nature*)

وكان كل خزان يحوي مقداراً ضئيلاً من الدواء: بضعة أجزاء من المليار من اللتر. ولختم العقار في الداخل وضع الباحثان غشاء من الذهب فوق الخزان، واستند اختيارهما للذهب لعلمهما المسبق بأن الذهب مادة سليمة داخل جسم المريض ولكونه لا يتفاعل كيميائياً ويقاوم الصدأ.

وبينوا أنهم يستطيعون إذابة الأغشية الذهبية واحداً تلو الآخر ببساطة، وذلك بتسليط جهد كهربائي يسبب سريان تيار كهربائي يمكن تزويده باستخدام بطارية كهربائية ضئيلة الحجم، فذرات الكلور الموجودة في جسم الإنسان والمشحونة كهربائياً جذبت إلى الأغشية وسببت تفاعلاً مع الأغشية الذهبية التي تغطي الخزانات أدى إلى ذوبانها.

ولتوكيد فعالية رقاقتهم ملأت المجموعة الخزانات بسوائل متوهجة، وقاموا باستخدام طابعات نفث الحبر (Ink - Jet) لبخ مقدار معلوم من السائل في كل خزان. وتوفر لديهم بهذه التقنية البسيطة ضبط كبير جداً، إذ تحكّموا بكمية السائل في كل خزان بدقة تجاوزت واحد بالمليار من اللتر، كما برهنوا على أن الأغشية الذهبية امتلكت قوة كافية لختم الحاويات المملوء بكفاءة، ونجحوا كذلك في الاحتفاظ بعددهم لمدة سنة من دون أن يحدث فيها أي تردٍّ.

ووضع الباحثون هذه العدد في محلول حيوي وسلطوا عليها فولتية (Voltage) صغيرة ـ أقل من فولتية بطارية ساعة ـ مع النتيجة التي تبينها الصورة أعلاه، إذ إن الغشاء الذهبي اختفى بعد دقيقة وانطلق الدواء.

ويمكن لرقاقة لانغر أن تكون مكتفية ذاتياً، فيمكن للرقاقة التي تزودها بالقوة بطارية مايكروية وتحكمها دائرة كهربائية تحوي برامج مخزونة في ذاكرتها أن تزرع لتسلم برنامجها العلاجي حسب توقيتاته. وتتمكن حبة الدواء الصغيرة من تحسس البيئة المحيطة بها وتتصرف بموجب البرنامج المدمج داخلها.

وإذ ما أخبرتها البرامجيات بأن شيئاً ما مفتقد، فستقوم الحبة بإعلام المريض وتجدول زيارة إلى غرفة الطوارئ أو إلى طبيب العائلة كما يتطلب الأمر.

إن أكثر الصيدليات ـ على ـ الرقاقة براعة لن تكون محملة بعدد محدود من العقاقير المحضرة سلفاً، بل ستحوي بدلاً من ذلك وحدات بناء جزيئية تمكن من إجراء عدد من المعالجات. ومع المختبرات ـ على ـ الرقاقة المبنية من قنوات ومضخات وحمامات

ومازجات وفاصلات مايكروية سيتاح لكل منا احتواء مجموعة من بادئات التقنية الحيوية المزدرعة الملائمة لنا والعاملة بوقت كامل.

وستستطيع هذه المختبرات تحليل الكيميائيات في مجرى دمنا ومن النظر إلى حالة الـ «دي. أن. آي.» والبروتينيات ومن إجراء التجارب الضرورية لاكتشاف أكثر الأدوية ملاءمةً لحالتنا:

هل تشعر بالصداع؟ دعني أمزج لك بعض الأسبرين.

تشعر بالتعب؟ سأعد لك (كابوتشينو) نانوية.

هل أصابتك صدمة فرط الحساسية؟ دع تلك الإبرة المخيفة، إذ سأقوم بإطلاق هورمون الإيبينفرين (Epinephrine) حيث تحتاجه ومتى تحتاجه.

ومع توفر هذه التقنيات على الرقاقة سيكون تنوع الأدوية التي يمكن إصدارها من الداخل من دون حدود. ويمكن للأدوية التي ستصنع على رقاقتك المزدرعة أن تكون قد أعدت لتلائم الـ (دي. أن. آي.) الخاص بك.

وبعض هذه العدد موجودة لدينا الآن بينما تنتظر البقية منها التطوير، فأنظمة إيصال الأدوية بطيئة الإطلاق قد تم استخدامها من قبل مئات الآلاف من المرضى والليبوزومات (Liposomes) الموجهة نحو خلايا معينة وصلت مرحلة الاستخدام السريري كذلك. أما أنظمة إيصال الدواء على الرقاقة المايكروية، فهي عملية، ويتطلب الأمر إثبات سلامتها وفاعليتها لدى المريض. ولكي يتم إطلاق أدوية تعتمد على مستوى الكيميائيات التي يتم قياسها في الدم يتطلب الأمر متحسسات كيميائية سليمة يعول عليها وتدوم طويلاً. وتتواجد مثل هذه المتحسسات لبعض الكيميائيات المهمة، كالأوكسيجين، أما لمواد أخرى مثل الكلوكوز فهي لا تدوم سوى بضعة أشهر في البيئة

القاسية داخل أجسامنا. ويجب توفير الطاقة للرقاقات المايكروية أيضاً. والبطاريات المايكروية فعالة، لكن توفير حل مستديم سيكون مفضلاً. وتبرز الآن تقنيات لشحن المنظومة، مثل الذبذبات الراديوية أو الأساليب فوق الصوتية. ويعرض لنا التقدم الأخير في جامعة تورنتو في صنع خلايا شمسية تولد الطاقة بموجات الأشعة تحت الحمراء بدل الضياء المرئي حلاً واعداً آخر، إذ إن الجلد والأنسجة لا تمنع نفاذ الأشعة فوق الحمراء إلا قليلاً (الفصل الرابع، **توفير الطاقة**).

إن اكتشاف الجزيئات الموجودة داخلنا قد شهد أيضاً تقدماً هائلاً، فقد قامت الفرق البحثية تحت قيادة الأستاذ تشاد ميركين (Chad Merkin) في جامعة نورث وسترن وتلك التي يقودها الأستاذ شانا كيلي (Shana Kelley) في كلية بوسطن في السنين الأخيرة بإحراز تقدم في حقول اكتشاف الـ «دي. أن. آي.» والبروتين بسرعة هائلة. والهدف هو رؤية توقيع المرض أو أدلة إلى الشفاء مستندة إلى أقل عدد ممكن من الجزيئات. وقد قامت مجموعة كيلي بتفصيل حجم وشكل أسلاك ذهبية ذات قطر نانوي للتحكم بالتفاعلات الكيميائية بين الجزيئات للحصول على أعلى أثر ممكن.

ومع هذه الاكتشافات يقترب الطب وبدرجة متزايدة إلى إيلاج ذاته في أنظمة التفاعلات الكيميائية المعقدة الفعالة داخل أجسامنا. والبراعة التقنية الفائقة لوحدها لن تكون كافية فسنبقى نتصف بالعمى ما لم نتعمق في فهمنا العلمي للسبب والتأثير. ونحن نكسب رؤية أعمق لأساليب الطبيعة من الجزيئية صاعداً من خلال توحيد عالمي البيولوجيا والحوسبة (Computing) ويشحذ التقنيون النانويون أسلحتهم متهيئين لاستخدامها مع الكسب الجديد في المعرفة.

الفصل الثالث

النمو

عندما ما تبدأ كوابح سيارتك أو مقودها توهن فستذهب إلى محل للصيانة. ويمكن في بعض الأحيان إصلاح الجزء بينما يتطلب الأمر في أحيان أخرى استبداله كلياً. ولا معنى للتردد في أي حالة حتى إذا ما كانت شمعة القدح غير تالفة تماماً، فتشغيل السيارة ـ وهي نظام معقد ذو عدد يصعب إحصاؤه من التفاعلات بين العديد من أجزاءها المهندسة بعناية ـ يمكن أن يسبب مشاكل جديدة وربما تكون أكثر كلفة. ألا يجب أن نطبق نفس المنطق على أجسامنا؟ إن محاولة أن نبرهن على أهمية الصيانة الوقائية لأعضائنا الداخلية لا تقل حجة عن قضية السيارة لأن ما هو موضع رهان شيء ثمين جداً، ألا وهو صحتنا، فالكبد الذي بدأ يضعف يؤثر على جسم المريض كله. وإذا لم يكن بإمكان الإصلاح إعطاء عضو جديد يعمل بصورة كاملة، أليس الاستبدال هو الخيار المفضل؟

إن استبدال الأعضاء أصبح الآن فعالاً ويمارس بصورة واسعة، فالأعضاء المزروعة من أناس آخرين تعطي نتائج ممتازة وتطيل العمر بعقود وتحسن نوعية الحياة بطريقة يصعب وصفها. والمشكلة هي أن الأعضاء التي يتبرع بها أناس أصحاء شحيحة جداً، فتوفرها المحدود

في العديد من النواحي أمر جيد، إذ إن استخدام أحزمة المقاعد (في السيارات) تضاءل معه عدد المتبرعين الأصحاء الشباب. لكن هذا يُحمل ثمنه للمريض الذي ينتظر بفارغ الصبر كلية جديدة. وينتظر نحو 80000 شخص في أمريكا الشمالية زراعة أعضاء، ويضاف شخص جديد إلى القائمة كل اثنتي عشرة دقيقة[1]. وزرع منهم ما يقارب 23000 أعضاء سنة 2000. ويموت نحو 15 في المئة من المرشحين لزرع قلب أو كبد وهم على قائمة الانتظار[2].

فهل الطريقة الوحيدة لإنتاج عضو بغرض زراعته هي إنماؤه داخل الجسم الإنساني عبر فترة عشرين سنة؟ والكِلْية ليست في الحقيقة إلا مجموعة من الذرات اتخذت مواقعها بصورة صحيحة نسبة إلى إحداها الأخرى، فهذه الذرات تشكل جزيئات وهذه الجزيئات تنتظم في خلايا تتعاون في مجموعات متناسقة لتعمل سوية كعضو. وإذا ما كان التقنيون النانويون غير مهيّئين اليوم لإنماء غريتا غاربو كاملة من نقطة الصفر، فإنهم على الأقل يحصلون على تقدم نحو إعادة إحياء بانكرياسها.

إنماء الأعضاء الاستبدالية في المختبر

يقوم الباحثون في هندسة الأنسجة أو الطب التجديدي بإنماء أعضاء استبدالية للجسم في المختبر. والكأس المقدسة لديهم هو توليد أعضاء جسمية استبدالية بكمية وافرة وسليمة ومتلائمة مقارنة بما هو متوفر اليوم من خلال التبرع. واستراتيجية ذلك هي كالتالي:

---

(1) Sophie Petit-Zeman, «Regenerative Medicine,» *Nature Biotechnology*, vol. 19, no. 3 (March 2001), pp. 201-206.

(2) U. A. Stock and J. P. Vacanti, «Tissue Engineering: Current State and Prospects,» *Annual Review of Medicine*, [vol. 52] (2001), pp. 443-451.

أولاً عليهم أن يقرروا عن حجم وشكل العضو. وهذا ما يمكن أن يتلاءم مع احتياجات المريض الخاصة، فلساق استبدالية يجب قياس وتحديد البنية التفضيلية للعظام والغضاريف والأوتار العضلية والروابط والأوعية الدموية والعضلات والأعصاب والجلد. ويقوم مهندس الأنسجة بعد ذلك بإنتاج مرتقيات (Scaffolds) مثل الهيكل الداخلي لبناية، وهذا سيحدد أبعاد الجزء من الجسم الذي يتم إنماؤه وهيكله العام. وأخيراً يتم ملء الهيكل بالخلايا يمكن بعد ذلك اعتبارها أنسجة مهيأة لزرعها في جسم المريض.

والخلايا ذاتها المستخدمة في هندسة الأنسجة هي موضوع بحوث مشوقة اليوم، فهي تؤخذ من المريض، وهذه ميزة تتجنب عدم المواءمة للجينات أو لفصيلة الدم التي تعتري عمليات زرع الأعضاء التقليدية.

ولكن إذا ما افتقدنا كِلْية فهل من المحتمل امتلاكنا خلايا كلية متهيئة بالانتظار لملء المرتقى؟

لا، وبدل ذلك سنستخدم الخلايا الجذعية، وهي خلايا تبدأ كخلايا عامة لكن يمكن رعايتها لتنمو عددياً ولتخصص ضمن أصناف خاصة من الخلايا.

ابتداع مادة البناء المناسبة

يجب أن توفر المرتقيات الأسس المعمارية التي ستنمو عليها الخلايا لتشكل العضو:

إن الجدران البلاستيكية وأدوات الطبخ لا تشكل وحدها مسكناً، فهناك حاجة لمخطط معماري يعطينا الشكل. والمرتقى يحدد هيكلية العضو الذي سيحصل على الحياة عندما يملأ بالخلايا. ويجب

أن توفر الغذاء للخلايا عندما ترحل إلى أكثر المواقع عمقاً في العضو. إنها في الحقيقة مكلفة بتلبية كل المتطلبات الجزيئية الخاصة لأي خلية على وجه التحديد مثل مناولة مشروبات الطاقة إلى راكضي الماراثون في مراحل مناسبة على طول الطريق.

وتستخدم السلاسل الجزيئية التكرارية ـ أي البوليمرات ـ لبناء هذه المرتقيات. ويجب أن يحدد نوع جزيئاتها لتلبية عدد من المعايير في ذات الوقت، فيجب على هذه المرتقيات أن تتيح للخلايا المرور خلالها وهو ما يتطلب ثقوباً تتشكل منها أنفاق ذات حجم صحيح وبوفرة. وتمتلك جدران هذه الأنفاق مساحة سطحية كبيرة توفر فرصة لارتباط عدد من الجزيئات عبر ممر الخلايا لتشجعها ولتغذيها عندما تمر. وأخيراً فإن هذه المرتقيات الأصلية الاصطناعية يجب أن تختفي وتستبدل بمادتنا البنائية الطبيعة عندما يتم زرع العضو. لذا فإن المرتقيات الاصطناعية يجب أن تحلل بيولوجياً ولكن ليس بتلك السرعة وقبل أن تتم مهمتها.

وقد وافقت إدارة الدواء الأمريكية على عدد من أصناف البوليمرات للاستخدام في التطبيقات السريرية البشرية. ويتحلل أحد هذه البوليمرات بسرعة خلال أسبوعين إلى أربع أسابيع، وذلك ما قد يكون أقصر من المدة المطلوبة لإنماء العضو. أما النوع الآخر فيبقى لسنوات. وقد قام العلماء بمزج هذين البوليمرين بنسب مختلفة ليضعوا من المزيج مرتقيات المصمم التي تدوم للفترة الصحيحة فقط، كما تم استخدام ـ أو بالأحرى إعادة استخدام ـ البوليمرات الطبيعة الموجودة في دواخلنا، والكولاجين (Collagen) هو أحد الأمثلة المعروفة.

ويشكل الكولاجين الذي يمثل الربع من مجموع البروتينات في

أجسامنا حبالاً جزيئية تقوم بتقوية الأوتار العضلية كما يشكل صفائح واسعة مرنة تدعم الجلد والأعضاء الداخلية.

وتقع مجموعة الهيدروجيل (Hydrogel) في الطرف الثاني لتسلسل الصلادة. وهي أنواع من الجيلاتين الطبيعي يشكلها جسم الإنسان، وتستخدم الأجيال المبكرة منها الآن بشكل عدسات لاصقة لينة. ويمكن الهيدروجيل، مثله مثل الجيلاتين، أن يبدأ تشكله كسائل ليتحول بعد ذلك إلى مادة صلبة. ويمكن للهيدروجيل أن يعوض عن الجراحة لزرع عضو جديد إذ يمكن حقنة كسائل يملأ العيوب ذات الشكل غير المنتظم في النسيج الموجود قبل أن يتحول إلى شكل صلب. ويمكن أيضاً للطبيب أن يتحكم بعملية تحول الهيدروجيل إلى مادة صلبة وذلك بواسطة الضوء الذي يدمج الجزيئات في سلاسل طويلة معطياً شكلاً لما كان سابقاً سائلاً.

وضع معمارية المرتقى وبناؤه

ولما كانت أعضاء جسمنا تختلف بدرجة واسعة، أكان ذلك بالحجم أو الشكل أو البنية أو الوظيفة التي يؤديها العضو، لذا فإن المرتقى الذي يبتدعه مهندسو الأنسجة ليساعد في إنماء أعضاء استبدالية يختلف بصورة واسعة.

لكن هذه المرتقيات تشترك على أي حال في هدف واحد: إيجاد مجالات مغرية لكي تسكنها الخلايا. إنها عليّه جميلة واسعة ذات سقف عالٍ وأثاث جذاب وهي مريحة وذات جو حميمي في ذات الوقت، إنها فسيحة لكنها لا تسبب رهاب الفضاء المفتوح، وهي تخلق بيئة ترحيبية مفصلة حسب رغبات الخلايا: قماش مطبوع وهرة لخلايا البانكرياس وزجاج وصلب منظف لخلايا الكبد.

وقد لجأ الباحثون إلى تكنولوجيا النسيج لابتداع مرتقيات، إذ قاموا بحياكة ألياف البوليمر القابل للانحلال البيولوجي لابتداع بنية نسيجية. وقد استخدمت مثل هذه الهياكل البسيطة لهندسة الغضروف والوتر العضلي والحالب والأمعاء والأوعية الدموية وصمامات القلب. لكن هذه الهياكل النسيجية تعاني مع ذلك من كونها ضعيفة ميكانيكياً وسريعة التحلل ومحدودة التصرف الذي تمتلكه على بيئة الخلايا المعاشية. وهي ليست إلا شاحنات وقتية تسكنها الخلايا، فهل ستنمو الخلايا التي ترعرعت في موقف الشاحنات لتصبح أوبرا؟ أو هل ستتحول إلى بريتني سبيرز(*) (Britney Spears)؟ إننا لا نتحمل المقامرة عندما يمكن أن تكون النتائج مثل هذه.

يتمكن الباحثون من بناء بيوت حميمية وصلبة. ويمكن في إحدى الطرق المعروفة باسم «فصل الأطوار» (Phase Separation) أن تستحث الخلايا لتفصل نفسها مثل ما ينفصل الزيت عن الماء وأن لا تمتزج مع بعضها، فيمكن مزج نوعين من البوليمرات بحيث يشكلان منطقتين متميزتين من كل نوع وليس من كليهما. ويمكن لتآلف آخر من الجزيئات أن ينفصل إلى منطقتين إحداهما غنية بالبوليمر والأخرى شحيحة، وتكون المادة الصلبة الناتجة مسامية. ويمكن إيجاد أوضاع تنتج مسامات ذات أحجام مختلفة تلائم خلايا معينة جيداً. وتقوم الطبيعة بتنفيذ كل العمل في هذه الطرق ويتم تحديد حجم الشقق الخلوية من قبل شوفينية وتعصب الخلايا التي تشكل هذه المجموعات المنفصلة. وتشبه بعض الأنسجة مثل الأعصاب والعضلات والأوتار العضلية والروابط الأنابيب أكثر من الكرات. وتم

(*) يشير المؤلف هنا إلى (أوبرا) مقدمة البرنامج التلفزيوني الأمريكي الشهير وإلى (بريتني سبيرز) المغنية الشعبية الأمريكية.

اللجوء إلى فصل الأطوار أيضاً لعمل مرتقيات تماثل هندسة هذه الخلايا. وقد بين بيتر ما[3] (Peter Ma) في جامعة ميتشيغان أنه قادر على إنماء مرتقيات تحوي أنابيب تشير إلى اتجاه معين، وأن ذلك يساعد على تنظيم أصناف خاصة من الخلايا لتتراصف في نفس الاتجاه، أي مثلما تفعله الخلايا في العضلة لتتمكن من التقلص المترابط.

إن ثمن تفويض جزء كبير من العمل إلى الطبيعة هو أننا نتنازل عن التحكم المعماري الكامل، لذا فقد شرع الباحثون إرضاءً لمعماريي الأنسجة ليظهروا لنا قدرتهم إذا ما تطلب الأمر بناء هياكل ثلاثية الأبعاد مسامّةً بعد مسامّة، فقد قام راسِل جيوردانو (Russel Giordano) وزملاؤه في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا بتكييف طرق الإنتاج الصناعي لمتطلبات مهندسي الأنسجة، فقد استخدموا التصميم والتصنيع المدعم بالحاسوب مستخدمين في البدء البرامجيات لتصميم هياكل ثلاثية الأبعاد. وقاموا بعد ذلك ببناء الهيكل طبقة فوق طبقة. قاموا أولاً بوضع طبقة من مسحوق، ثم قاموا بعدها بطبع مادة كيميائية بواسطة رشّ الحبر (Ink-Jet Printing) انتقائياً على مواقع معينة، ما سبَّب التصاق المسحوق، ثم غُسل المسحوق من المناطق التي لم تُرش بالحبر. وبنوا شبكة ثلاثية الأبعاد بنفس الطريقة التي تبنى فيها بناية متعددة الطوابق طابقاً بعد طابق. والفرق الوحيد أنهم في هذه الحالة قاموا بسكب ما يكفي من الإسمنت لطابق واحد ثم صهروه حيث هناك حاجة في النهاية له فقط.

(3) Peter X. Ma, «Scaffolds for Tissue Fabrication,» *Materials Today* (May 2004), pp. 30-40.

ونتج عن طريقه جيوردانو شققاً مصممة خصيصاً ـ لكنها واسعة بإفراط ـ وتبلغ مئات المايكرومترات مساحة، وذلك أكبر بكثير من الخلايا المفردة. والخلايا تفضل مساكن أكثر دفأ، وهي أكثر حساسية للإشارات الكيمائية التي توفرها الجزيئات ذات الحجم النانوي. وقدم آخر البراهين على هذه النقطة[4] من جورج وايتسايدز (George Whitesides) ودونالد إنغبار (Donald Ingber) من جامعة هارفارد، فقد قام الباحثان بتبليط أرضيات حجيرات الخلايا بمخططات ذات مساحات نانوية ومايكروية. وتبين أن حجم هذه المخططات الذي كان أصغر بكثير من الخلايا هو الذي قرر بقاء أو موت الخلايا. لذا يتبين أن التصميم له أثر هائل على حياة أو موت الخلايا، ففن البناء بالنسبة للبعض هو إله الحب أو إله الموت.

بعث الحياة في المرتقى

قام سام ستاب (Sam Stupp) من جامعة نورث وسترن في ولاية إيلينوي مؤخراً ببناء مرتقى أوصلنا إلى حد أقرب بكثير إلى الهدف النهائي للتحكم النانومتري على عادات الخلايا. وعمل ستاب مع النيورونات (Neurons)، وهي الخلايا التي تحمل الرسائل عبر جهازنا العصبي المركزي. ويمكن أن يصاب المرء اليوم بالشلل إذا ما أصيب نخاعه الشوكي أو انقطع نتيجة حادث أو مرض. وتعطي بحوث ستاب الأمل بأننا سنستطيع يوماً ما استخدام الإنجازات في هذا الميدان من الطب التجديدي لإعادة الفعالية للأفراد الذين أصيبت أعصابهم.

---

(4) Christopher S. Chen [et al.], «Geometric Control of Cell Life and Death,» *Science*, vol. 276 (30 May 1997), pp. 1425-1428.

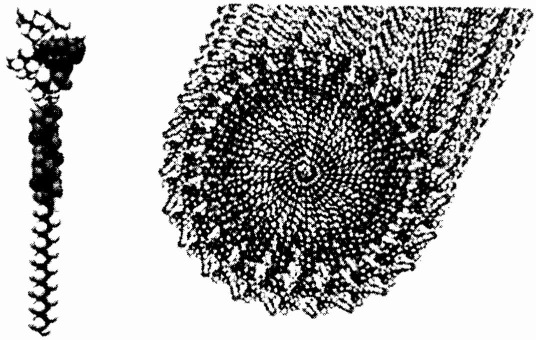
وكانت فكرة ستاب هي أن يهندس إشارات كيميائية في مرتقياته، فهو سيستخدم البروتينات ليبرمج الخلايا الجذعية للتخصص كنسيج عصبي ذي فائدة بدل أن يكوّن نسيج إصلاح الندب والجروح غير المفيد، لا بل حتى المضرّ. وسيقوم ببناء مثل هذا المرتقى ويملأه بخلايا جذعية وسيستقصي ما إذا كانت استراتيجية ناجحة. وبدأ ستاب العمل بالخلايا الجذعية داخل أجسامنا من تلك التي تساعد على الحلول محل خلايا الجهاز العصبي المركزي التي تفتقد نتيجة المرض أو الإصابة.

وصمم ستاب جزيئة واحدة دقيقة الصنع تقوم بمساعدة نزعة الطبيعة نحو ترتيب الذات بفعل كل ما هو مطلوب: لتكوّن من ذاتها مرتقى ولترعى نمو الخلايا العصبية المطلوبة. وبنى ستاب جزيئات ستنظم ذاتها كقضبان طويلة قوية شبيهة بأعمدة ودعامات البناء. وقد أنجز ذلك بجعل نهايتي جزيئاته مختلفتين، فإحدى النهايتين حيث يسكن البروتين المشجع للنسيج العصبي صممت لتكون محبة للماء، بينما صممت النهاية الأخرى لتكون كارهة للماء. واختارت هذه النهاية أن تتكتل مع مجموعة من الجزيئات المشابهة مع نهاياتها الكارهة للماء متجهة نحو الداخل حامية إحداها الأخرى من التعرض للماء. وأغرت هذه الاستراتيجية الجزيئات على ترتيب نفسها بشكل أسطوانات طويلة شكلت نهاياتها بروتيناتها المشجعة للخلايا السطح الخارجي للقضبان موجهة نحو النسيج المطلوب إنماؤه.

وقام ستاب بدمج هذه القضبان التي تنظم ذاتها مع استراتيجية الهيدروجيل.

وكانت مادته الأصلية سائلة متوفرة للمرضى في المستقبل لتعطي لهم بشكل حقنة أبرية. وستتنافر الأسطوانات على هذا التنافر، يساعدها على ذلك الجسم بواسطة شحناته الموجبة، وستشكل مرتقى

من خلال تجمعها. وأضاف ستاب وزملاؤه الخلايا الجذعية وترك المرتقيات تجمع أنفسها وأعطى الخلايا الوقت لتعاني من تأثير المرتقيات.



جزيئات سام ستاب (Sam Stupp) المصممة وتنظيمها الذاتي. تبدو على اليسار جزيئة مفردة. ذيلها (الجزء الأسفل) يكره الماء مما يساهم في شكل التنظيم الذاتي التالي للقضبان. أما رأس الجزيئة (الجزء الأعلى) فيحوي البروتين الذي عزز تشكيل الخلايا العصبية السليمة. ويبين الشكل على اليمين الأسطوانات التي تجمعت إليها جزيئات ستب المصممة ذاتياً. وتتجه الذيول الكارهة للماء فيها نحو الداخل وتتجمع سوية في حين تتجه الأجزاء المحبة للماء إلى الخارج مما يعرض بروتيناتها المعززة لنمو الخلايا نحو الأنسجة التي ستنمو (بموافقة من مجلة *Science*)

وأدرك الباحثون بسرعة أن الخلايا نجت وأنها بحالة جيدة، إذ كانت المغذيات والأوكسيجين وبقية الجزيئات الضرورية لحياة الخلايا تصل المناطق التي كان هناك حاجة لها. وفتش الباحثون عن مؤشرات عن كون المرتقيات تساعد الخلايا على الازدهار ووجدوا أن الخلايا العصبية نمت بحجم أكبر بكثير عندما كانت تنمو داخل المرتقى الفعّال. واختبروا أيضاً شكل الخلايا باحثين عن إشارات تدل على أن

الخلايا كانت تكوّن النويريتيات(*) (Neuritis)، أي إنها خلايا عصبية فعالة تتمتع بالصحة ولها فروع تمتد لتصل بالخلايا الأخرى، بدل خلايا النسيج الذي تلتئم به الجروح النجمية الشكل. لقد وجدوا أن المرتقى أدى إلى تكون سريع لخلايا معافاة.

واستقصى ستاب أيضاً دور البروتينات، التي يفترض أنها تشجع نمو النويريتيات والتي غطت سطح المرتقى، وقارَنَ بين اثنين من المرتقيات أحدهما مغطى بالبروتين والآخر غير مغطى. ولم تتخصص الخلايا الجذعية على المرتقى غير الفعال، أكان إلى خلايا عصبية جيدة أو سيئة: إنها فقط رفضت أن تنضج. ومع استخدام المرتقى غير الفعال أضاف البروتين إلى المزيج، لكن لم يربطه بالمرتقى. ولم تندمج الخلايا في المرتقى، كما لم ينمُ منها نويريتيات تشير إلى كونها تشكيلات لخلايا عصبية معافاة. وبذلك برهن ستاب على أن كلاً من الهيكلية والكيمياء مهمان لملء المرتقى بخلايا عصبية سليمة.

تحويل الخلايا إلى أعضاء

ما الذي يجعل إحدى الخلايا تنمو لتجعل الكلية تعمل بينما تساهم الأخرى في تفعيل كبد معافى؟ يجيب الباحثون في ميدان الخلايا الجذعية عن هذه الأسئلة ويستخدمون فهمهم الجديد لبناء أعضاء من خلال هندسة الأنسجة.

إن الخلايا الجذعية مثل طلاب جامعيين في سنتهم الأولى لم يتخصصوا بعد ولم يصرحوا هل سيعملون ككلية أو عظم أو خلية

(*) النويرويت هو أي امتداد أو بروز من الخلية العصبية يربطها مع خلية عصبية أخرى.

بصرية[5]. ولهذه الخلايا خاصيتان مهمتان: إنها تستطيع خلق خلايا جذعية أخرى من دون تخصص، مكثرين بذلك سكان المرتقى من الخلايا المستقبلية ومن ثم تقوم بالاختلاف في تشكيلة من تخصصات ممكنة ـ قلبية، كلوية، أو كبدية على سبيل المثال. ويقوم الباحثون أولاً عند استخدام الخلايا الجذعية في هندسة الأنسجة بجمع هذه الخلايا وتفريخها لزيادة عددها ومن ثم يشجعون التخصص المطلوب في العضو الذي يرومون تعبئته.

وتتمكن الخلايا الجذعية من التباين إلى نوع من الخلايا الاختصاصية تقريباً.

أما الخلايا السلفية (Progenitor Cells) فهي تختلف عن الخلايا الجذعية كونها متباينة بمستوى واحد فقط نحو التخصص. وهي تمتلك إمكانية محدودة للتخصص: أي إنها قد اختارت التخصص العلمي بدل الإنسانيات لكن لم تختر حتى الآن الكيمياء أو الفيزياء أو الجيولوجيا. والخلايا الجذعية لكونها تستطيع التكاثر والتخصص تُعتبر من المرشحين متعددي البراعات للإسكان في المرتقيات، وبذلك للنمو لتضبح أنسجة جديدة. وهي ذات فائدة بما يتجاوز هندسة الأنسجة أيضاً، إذ إنها تخضع للدراسة للاستخدام في أمراض القلب والسرطان والسكر والألزهايمر وباركنسون.

وكانت الخلايا الجذعية تحت الأضواء الكاشفة في السنين الأخيرة بسبب الجدل حول أحد مصادرها. وأكثر الخلايا براعة هي تلك التي تتكون منها خلايانا كبالغين، أي البيضة المخصبة إضافة

(5) Jochen Ringe [et al.], «Stem Cells for Regenerative Medicine: Advances in the Engineering of Tissues and Organs,» *Nature wissenchaften*, vol. 89 (2002), pp. 338-351.

إلى النسل المتولد من أول انقسامين لهذه الخلية، والتي يمكن أن تكوّن أي نوع من الخلايا. وبعد نحو أربعة أيام تبدأ هذه الخلايا بالتخصص مشكّلة محارة تحيط بعنقود الخلايا التي سيتطور منها الجنين. وهذه خلايا متعددة الإمكانيات يمكنها التباين إلى أي نوع من الخلايا نحتاجها أنا أو أنت.

لكنها لا تستطيع وحدها أن تكون جنيناً كاملاً لأنها لا تستطيع أن تكون المشيمة والأنسجة الداعمة. ويمكن استحصال هذه الخلايا من الأجنة التي تكونت بواسطة التلقيح خارج الجسم وتم التبرع بها من قبل الأبوين بطريق غير رسمية والتي كانت ستتلف إن لم تستغل بهذه الطريقة. ويمكن أيضاً استحصال الخلايا الجذعية الجنينية من الأنسجة الموجودة في جنين والتي كانت ستتطور عند البلوغ إلى أعضاء تناسلية.

وقد أظهرت البحوث على الخلايا الجذعية الجنينية في الفئران المرونة المدهشة لهذه الخلايا. كما أظهرت ورقتان نشرتا سنة 1998 نمو خلايا جذعية جنينية من الإنسان. وقد تم منذ ذلك الحين الكشف عن إمكانية هذه الخلايا تكوين خلايا دماغية وجلدية وخلايا قلبية فعالة.

إن الاستنتاج الحيوي العلاجي يوفر مسلكاً آخر لاستحصال خلايا جذعية غير متخصصة، فالنواة وهي قلب الخلية يمكن أن تؤخذ من خلايا المريض وتنقل إلى خلية جذعية كانت نواتها قد استلت. وتستخدم هذه التقنية المادة الجينية للشخص ذاته، وبذلك تتجنب مشكلة عدم المواءمه الجينية بين المتبرع والمستلم. لكن الاستنساخ الحيوي العلاجي وما يليه من تفريغ مازال ينتظر أن يعطينا أكثر من ستة خلايا.

ويعتقد الكثير من الباحثين أن أساليب الخلايا الجذعية الجينية إذا ما طُورت لتعمل بموثوقية ستوفر لنا خلايا جذعية ذات مرونة ويمكن أن تتباين لتحقق أي تخصص مرغوب. وقد تركز الانتباه مؤخراً على الخلايا الجذعية للبالغين بدل الخلايا الجذعية الجينية وذلك بسبب الاهتمام حول مصدر هذه الخلايا.

وكان العلماء يوماً ما يعتقدون أن مصدر الخلايا العاملة كاملة التخصص هي خلايا جذعية للبالغين ذات اختلاف بسيط. وكانت هذه الخلايا مكرسة لتوليد مدى محدود من النسل. لكن المنظور الجديد أكثر تشجيعاً: وأنسجتنا البالغة تحوي خلايا جذعية متعددة الإمكانيات يمكن لها أن تنتج عدداً من أنواع مختلفة من الخلايا الجذعية الملائمة لمواقعها، فالخلايا الجذعية التي في أمعائنا يمكن أن تنتج مدى من أنواع الخلايا المختلفة المطلوبة في الهضم وامتصاص المغذيات. ويمكن لخلايا البالغين الجذعية إذا ما وضعت في بيئة جديدة أن تغير تخصصها وتتحول إلى خلايا متخصصة مختلفة غير موجودة عادة في بيئة نسيجها التقليدية. كذلك فإن بعض الأصناف من دوزينة من مختلف أنواع الخلايا الجذعية للبالغين قد تتمتع بنفس درجة المطواعية التي تمتلكها الخلايا الجذعية الجنينية، وبذلك تمتلك نفس الفائدة في ميدان الطب التجديدي.

والتحكم في متى وكيف تختلف الخلايا الجذعية أمر أساسي في هندسة الأنسجة.

وقد أحرز العلماء مؤخراً تقدماً ملحوظاً على هذه الجبهة، فهم يعرفون كيف يمنعون حصول الاختلاف ويمتلكون درجة من التحكم ضرورية لكي تتيح للخلايا التكاثر عددياً ويستطيعون توكيد عدم تحور الخلايا نحو نوع غير النوع المطلوب. كما أنهم اكتشفوا طرقاً تترعرع بواسطتها الخلايا لتتحور ويستطيعون توكيد عدم تحور الخلايا نحو نوع غير النوع المطلوب، كما أنهم اكتشفوا طرقاً تترعرع بواسطتها

الخلايا لتتحور إلى خلايا قلبية أو خلايا دم أو خلايا جلد أو دماغ أو أعصاب أو عضلات أو مشكلة للعظام أو دهون أو كبد أو بانكرياس. ومما يجدر ذكره أن الخلايا تستجيب لوطأة أمثالها، فتركها تترعرع بوجود خلايا بالغة تدفعها إلى أن تتحور إلى نفس النوع من الخلايا.

إن هندسة الأنسجة هي عملية بارعة في التحكم بالجزيئات والمواد. وتعتمد على تلقين الخلايا كيفية الاستجابة لرغباتنا وتستخدم تشكيلة من العقاقير ومن البنى جيدة التصميم لإنجاز ذلك. وهذا ما يؤكد نقطة ذات صلة واسعة لكل نواحي التكنولوجيا النانوية: إن بيولوجيا الخلية ليست منحصرة في الكيمياء الحيوية كما أنها ليست مستندة بصورة مطلقة إلى آليات الخلايا وكذلك فهي ليست سوسيولوجيا الخلايا وحسب، إنها كل هذه الأشياء مجتمعة.

ازدراع الأعضاء المهندسة في الكائنات الحية

لما كانت هندسة الأنسجة مهمة بهذا التعقيد وتلك الأهمية فسيكون اختبار فعاليتها في الكائنات الحية أمراً خطيراً. وقد بدأت هذه التحريات في أواسط التسعينيات بدراسات على الحيوانات.

وقد بيَّن بوب لانغر في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا مؤخراً[6] كيف يمكن استخدام هندسة الأنسجة للتعامل مع أكبر مشكلة صحية في أمريكا الشمالية الحديثة.

إن السبب الأول للموت المبكر في أمريكا الشمالية هو تصلب الشرايين، أي تردي حالة الشرايين نتيجة تراكم الترسبات الدهنية، الذي يؤدي إلى النوبات القلبية والسكتات الدماغية وانسداد شرايين الساقين. ويقوم الجراحون بتجاوز الانسدادات في الأوعية الدموية

---

(6) L. E. Niklashon [et al.], «Functional Arteries Grown in Vitro,» *Science*, vol. 284 (16 April 1999), pp. 489-493.

باستخدام التطعيم بواسطة شرايين أو أوردة مأخوذة من مواقع أخرى في جسم المريض. لكن العديد من المرضى يفتقدون الأوعية المناسبة لإعادة زرعها إذا ما كانوا مثلاً قد خضعوا لجراحة سابقة. وقد رأى لانغر الحاجة لاستخدام هندسة الأنسجة لإنماء مواد خارج الجسم لتعمل كوعاء دموي للتطعيم.

كان على مجموعة لانغر أولاً إنماء الأوعية في المختبر، فقد وضعوا خلايا العضلة الملساء في مفاعل حيوي توجد في داخله مرتقيات بوليمرية. وقد افترض لانغر أن أفضل طريقة لتطور الطعوم ستكون داخل بيئة تشابه إلى حد بعيد مقصدها النهائي، وبذلك استخدم نبضاً دورياً، مقلداً بذلك تدفق الدم لكي يحفز الأوعية خلال فترة النمو. وتم إنماء مجموعة من الطعوم تحت هذا الإجهاد النبضي خلال ثمانية أسابيع، ونُمّيت عينه أخرى تحت ظروف مماثلة فيما عدا النبض، وقام الفريق بعد ذلك بزرع العينات في خنازير. وتمت مراقبة الحيوانات، وكان العلاج الإضافي الوحيد هو جرعة أسبرين يومية. وقد وجدوا أن الطعم الذي نُمّي تحت الإجهاد النبضي بقي سالكاً وفعالاً لمدة أربعة أسابيع في حين أن العينة الأخرى التي نميت دون إجهاد نبضي أبدت انسدادات بعد ثلاثة أسابيع.

كما وجدوا أن العينة الأولى حافظت على الغرز التي استخدمت لتثبيتها في موقعها بطريقة أفضل من العينة الثانية. وقد انتجت التقنية العديد من الخلايا التي لم تكن تتكاثر عددياً وهو أمر مهم في الحفاظ على الأوعية المهندسة غير مسدودة.

وقد برهن لانغر على إمكانية إنماء الأوعية الدموية بمساعدة الخلايا المأخوذة من الكائن والمنماة على مرتقى ليجعل منها نسيجاً ذا فائدة، وأن ذلك النسيج المهندس خدم غرضه جيداً عند زرعه في كائنات حية.

وقد قام جوزف فاكانتي (Joseph Vacanti) وزملاؤه مؤخراً في موقع قريب هو مدرسة هارفارد الطبية بتناول مشكلة إنماء عضلة قلبية في المختبر.

والخلايا المسؤولة عن تقلص عضلة القلب السليم هي خلايا متميزة جداً. وإذا ما ماتت هذه الخلايا خلال نوبة قلبية فهي لن تتمكن من التجدد. ويقدم الطب التجديدي طريقة لاستبدال نسيج القلب التالف ولإعادة القلب إلى حالته المعافاة. وقام فاكانتي وزملاؤه بإنماء نسيج قلبي بالاستنبات على مشبك من البوليمر وكانت الخلايا القلبية مأخوذة من الجرذان. وبدأت الخلايا تنبض بعد ثلاثة أيام.

وبيّن تقرير صادر عن نفس الفريق(7) عن تقدم نحو ابتداع معدة من نسيج مهندس. وهدفهم هو ابتداع نسيج يمكن أن يعوض عن نسيج المعدة الإعتيادي ويقوم بعمله الأيضي للمغذيات بنجاح. وقام الباحثون بأخذ خلايا معدية وزرعوها على مرتقى وقام بعد ذلك بازدراعها في الفئران. وبدأت الأوعية الدموية بعد أربع أسابيع بتغذية المعدة بالدم وبدأت بطانة المعدة تتطور. ورأى الباحثون أيضاً أدلة على أن الخلايا بدأت باتخاذ مميزات عضلات المعدة.

وبيَّن نفس الفريق بعد ذلك في سنة 2004(8) أنهم يستطيعون

---

(7) Tomoyuki Maemura [et al.]: «Initial Assessment of a Tissue Engineering Stomach Derived from Syngeneic Donors in a Rat Model,» *ASAOI Journal* (2004), pp. 468-472, and «A Tissue-Engineered Stomach as a Replacement of the Native Stomach,» *Transplantation*, vol. 76, no. 1 (15 July 2003), pp. 61-65.

(8) Haru Abukawa [et al.], «Reconstruction of Mandibular Defects with Autologous Tissue - Engineered Bone,» *Journal of Oral and Maxillafocial Surgery*, [vol. 62] (2004), pp. 601-606.

إنتاج عظام لتستخدم في الجراحة الترميمية. إن إنماء العَظام من جديد من خلال هندسة النسيج ستعني أن الأطباء سوف لن يحتاجوا إلى إزالة عظام من موقع ما في جسم الشخص المتبرع. وسيكون العظم المستحصل من هندسة النسيج متلائماً تماماً مع المريض لأنه أنمي من خلال المريض نفسه. وقام فاكانتي ببناء عظام مهندَسة نسيجياً واستخدمها سوية مع عينات للتحكم في تنفيذ عملية إعادة بناء. وبعد ستة أسابيع من ازدراعه كان العظم المهندَس يماثل العظم الأصلي في صلادته، وأظهر الفحص بالأشعة السينية أن الارتباط بين العظم الأصلي والمطعَّم كان قوياً وكاملاً بدرجة لم يتمكن الباحثون معها من تمييز موضع الالتحام. وكانت الأوعية الدموية قد بدأت بالنمو في النسيج المزروع.

وقد قام فاكانتي مؤخراً[9] بإنماء أمعاء غليظة جديدة وهي ذات أهمية كبيرة لمن يعانون من سرطان القولون. ويجب لدى هؤلاء المرضى إزالة القولون والتعويض عنه بكيس اصطناعي. لكن الكيس الاصطناعي لا يستطيع القيام بمهمات الأمعاء الغليظة في معالجة المغذيات كما أن الكيس عرضة لأن يتلوث مما يتطلب جراحة جديدة. ولكي ينمي فاكانتي قولونا جديداً قام بأخذ خلايا جذعية من قولون جرز وأنماها على مرتقى، ووجد أن القولون المهندَس نسيجياً يمكن أن يؤدي المهمات الفيسيولوجية التي يزودها قولون أصلي سليم.

مستقبل هندسة الأنسجة

إن الأعضاء المهندَسة هي حلم طبي يتحقق. ومازالت التقارير

---

(9) Tracy C. Grikscheit [et al.], «Tissue - Engineered Large Intestine Resembles Native Colon with Appropriate In Vitro Physiology and Architecture,» *Annals of Surgery*, vol. 238, no. 1 (July 2003), pp. 35-41.

ترد عن الأنسجة المهندَسة المزدرَعة والمندمِجة، وعن ملاءمتها وعن أدائها في الحيوانات. إن إمكانيات هذا الميدان هائلة، إذ إنه قد يتيح لنا استبدال أعضاء الجسم المعتلّة عندما تقترب من نقطة الفشل المميت، كنوع من الصيانة الوقائية. وقد تتطلب بعض الأساليب جراحات مماثلة لجراحات زرع الأعضاء الحالية، بينما قد لا تتطلب غيرها، مثل أنسجة سام ستاب، ذاتَ الأساس من الهيدروجيل أكثر من حقنة إبرية.

وعندما تقع حادثة سيارة أو يصاب المرء بمرض يهدد حياته فقد لا تتوفر له فترة ستة إلى ثمانية أسابيع لينتظر عضواً جديداً. وسيكون لكل منا نتيجة لهندسة الأنسجة ذخيرة من الأعضاء الاستبدالية تنمو في مفاعلات حيوية مكرسة لهذا الغرض في مزرعة الأنسجة مهيأة وتنتظر الوقت الذي نحتاجها فيه ـ جسم مكرر؟ ومتى سنشعر أننا قد تمادينا أكثر مما يجب أخلاقياً؟ سنقوم من دون أي شك بإنماء وزرع كلية مهندَسة لمريض سيموت بدون هذه المعالجة.

ولكن ماذا عن التحسينات؟

قلوب أقوى وأحسن للرياضيين، إطالة الساقين للراغبات بأن يصبحن عارضات أزياء، أجزاء دماغية أكثر مطواعية لأولئك الراغبين في إتقان مكائد جديدة تماماً في عمر متقدم، كتعلم لعب الشطرنج أو إتقان التفاوض أو العزف على الكمان.

نلتقي اليوم بكثرة مع عقاقير تعزيز الأداء، لكننا لسنا ثابتين، فالجرعات المفرطة من الكافيين الذي يعزز الأداء مسموح بها ـ وهي في الحقيقة موضع طلب كبير ـ في الدراسات العليا. والكافيين بالطبع يعزز أداء الرياضيين، لكن تعليمات المنشطات للجنة الأولمبية الدولية تقر بأنه جزء من الحمية اليومية لمعظم الناس في العالم، لذا فإن

الرياضيين يستطيعون أخذ الكافيين إلى مستوى معين، وهذا المستوى المسموح به كاف لتوفير فائدة في الأداء.

قد لا ترغب في فكرة التدخل كيميائياً في فسلجتنا إذا ما كانت إمكانياتنا ضمن المدى «العادي». وبالرغم من ذلك، فكل من الغني والفقير في العالم اليوم له طرق وصول مختلفة عن بعضها إلى أكثر معززات الأداء التي نعرفها كفاءة، ألا وهي الغذاء الذي نتناوله، بما فيه الموازنة الصحيحة للبروتينات والفيتامينات والكاربوهيدرات والشحوم.

وما الذي سنفعله وسط هذه المجموعة المعقدة من المسموح به والمقيد بالعظام والعضلات والغضاريف المهندَسة حديثاً؟ وإذا ما تمكنّا من تطوير الإجراءات وتقليص المجازفة والإبقاء على كلفة مقبولة فقد لا تقاوم إغراء التجربة، أي أن ندفع الطرق. إنه الاستقرار الطبيعي لتعطشنا الذي لا يرتوي لتحسين الذات.

لقد حانت الفرصة لمواجهة هذه الأسئلة عن المبادئ والسياسة اليوم مع هذا التقدم المتسارع في هندسة الأنسجة، فنحن لازلنا نمتلك بعض الوقت قبل أن تلحق براعتنا النانومترية بالإمكانيات التي قد نتصورها، فعمل سام ستاب واحد من أوائل الأمثلة عن حديثنا المقنع مع الخلايا سوية باللغة النانوية للجزيئات الحيوية والعامية المايكروية لمعمارية المرتقيات. ويتبقى كم كبير من العمل لكي نفهم بصورة كاملة كيف نومئ إلى الاستجابات المرغوبة من الخلايا والأنسجة، فالعديد من أوائل الأنسجة المهندسة وفرت أعضاء مصنوعة أساساً من نوع خلوي واحد. والبحث مطلوب لنتمكن من تطوير أعضاء معقدة تتألف من أنواع عديدة من الخلايا والبنى التحتية. وقد وضع مايكل سيفتون (Michael Sefton) من جامعة تورنتو أنظاره على إنماء قلب وهو بنية عضلية دقيقة تحوي أوعية

دموية فائقة الأهمية. وهناك صدع واسع موجود بين ما يمكننا إنجازه الآن وبين الهندسة التي ستؤدي بنا إلى عضو معقد مثل هذا. ويجب إضافة إلى هذا فهم هندسة الأنسجة وإلى تبيان سلامتها في جسم الإنسان المشهور باستجابته المختلفة عن النماذج الحيوانية.

ومع ذلك فقد ذهبنا بعيداً في فترة قصيرة. لقد قام لانغر وفاكانتي بزرع أنسجة بسيطة مهندسة في نماذج حيوانية وتم تقبل واندماج هذه الأنسجة ضمن أفرادها وأدت مهماتها. إن الأسلوب المتبع في هذا الميدان ـ أي استخدام خلايانا وتجنب رفض الأعضاء بطريقة بارعة ـ مسؤول عن قدر كبير من سرعة النجاح في المراحل الأولى. وقد يعطينا فهم أكبر وتحكم أفضل بالخلايا الجذعية القدرة على إعادة أجزاء أجسامنا إلى مراحلها الأولى للنمو لتتطور ولتستعيد شبابها. إن عهد الشباب المستعاد ـ تلك السنين النشطة القوية المشبعة بالجنس، والتي ظننا يوماً ما أنها افتقدت ـ قد يكون قريباً.



البيئة

إذا كانت اهتماماتنا حول قدرنا الفردي تتركز معظم الأحيان على صحتنا فتتركز اهتماماتنا الكونية على البيئة الطبيعية. وسنقلق بصورة خاصة حول أن ما نفعله اليوم سيحدد مستقبل أبنائنا.

إن قضية الطاقة هي أول ما يتبادر إلى الذهن. إن ذخيرتنا من الطاقة المختزنة، والتي وفرت لنا بسخاء بشكل أنواع من الوقود الأحفوري ذات كمية محددة. إضافة إلى أننا عند تحرير هذه الطاقة نولد ملوثات سامة وغازات دفيئة. ويبدو أن اعتمادنا على هذا النوع من الطاقة وموفريها أمر خارج نطاق سيطرتنا، فالولايات المتحدة على سبيل المثال وهي تضم أقل من واحد بالعشرين من سكان العالم تستهلك ربع كمية الطاقة في العالم، وهي تستورد اليوم أكثر من نصف نفطه. إن كلفة اعتماد الولايات المتحدة عبر السنين الثلاثين الماضية على النفط الأجنبي تم تقديرها بسبعة تريليونات دولار. وتتأثر أعمال ذلك القطر على المسرح الدولي بالحقيقة الواقعية لهذا الاعتماد.

كيف يمكن أن يتغير سلوك بقية القوى العظمى على المشهد السياسي العالمي إذا ما كانت أمريكا مكتفية بالطاقة؟

قد يعرف العالم ذلك خلال جيل أو جيلين، فالتكنولوجيا النانوية تسارع في تقدم إمكانياتنا على استقلال وخزن طاقة الشمس الهائلة بطريقة رخيصة وكفوءة. وعند حدود مستويات الاستهلاك الحالية لن يتطلب الأمر من أمريكا سوى تغطية واحد بالعشرة من مساحة ولاية نيفادا بخلايا شمسية كفوءة لتحقيق مجمل متطلبات الأمة من الطاقة.

إن تلوث البيئة ـ التخلص من النفايات والإنتاج الصناعي وحتى الأفعال الإرهابية المفقودة ـ تخلق تحديات إضافية معقدة ذات طبيعة تكنولوجية وأيضاً سياسية، فالبحوث التي بدأت منذ الآن ترمي بثقلها في هذا الميدان من خلال تمكيننا من التحسس المبكر والدقيق للأخطار البيئية، وذلك هو المماثل الكوني للتحسس المبكر للسرطان على المستوى الفردي الذي بحثناه في الفصل الأول.

وتوفر التكنولوجيا النانوية الوسائل لرؤية الأخطار قبل أن تصبح قاتلة. وهي تمكننا أيضاً من معالجة المآسي البيئية المشخصة بما يقلل وحتى بما يعالج آثار التلوث: تنظيف المياه الجوفية وتقليص كمية الانبعاثات الضارة ومعالجتها. وقد تكون هناك واجهة سلبية للتكنولوجيا النانوية مع البيئة أيضاً: والجسيمات النانوية قد تحمل في طياتها تهديداً للبيئة ولصحة الإنسان ومن الأمور الأساسية أن ننظر فيما إذا كانت الأطر التنظيمية المتوفرة لنا اليوم ستستطيع توقع السمية غير المتوقعة للمواد الجديدة والتصدي لها عندما تبتدع.

ولا يقتصر التقنيون النانويون في استخدام مهاراتهم على مساعدة البيولوجيين، بل إنهم يستوحون من الطبيعة كيفية هندسة المواد الجديدة وتوظيفها.

ويتعلم الباحثون من الطبيعة في بناء المواد النانوية التي تتصف

بالفاعلية والحيوية ويتعلمون أيضاً من الآليات الطبيعية كأنظمة في بناء المواد، كأنظمة البروتينات التي تحول السكر إلى حركة وقوة. ويستكشف حقل البيومتريات (Biometrics) الروابط بين ما هو بيولوجي وما هو كيميائي وما هو ميكانيكي، وهي الارتباطات على المقياس النانومتري التي نخبرها كل يوم من خلال قوة العضلة وصلادة قواقع البحر ومرونة الجسم البشري.

الفصل الرابع

توفير الطاقة

تقذفنا الشمس يومياً بقدر من الطاقة يفوق ما نستهلكه بعشرة آلاف مرة. وإذا ما استطعنا تغطية عشر الواحد في المئة من مساحة الأرض بخلايا شمسية، وكانت كل خلية ذات كفاءة تبلغ 10 في المئة فقط، فسنتمكن من تلبية احتياجاتنا للطاقة بصورة كاملة باستخدام هذا المصدر النظيف فقط. وإذا ما استطعنا خزن ونقل الطاقة التي أمسكنا بها بكفاءة فسنقدر أن نخرج من الحلقات التي تؤدي إلى البقع النفطية والمخلفات النووية وغاز ثاني أوكسيد الكاربون المسبب للدفيئة العالمية (Greenhouse) وهواء المدن البغيض.

لقد قمنا منذ عقود ببناء خلايا شمسية كفوءة تحوّل الطاقة الشمسية إلى كهرباء. والخلايا الشمسية ملتقطات نقية لطاقة الشمس. وهي فلطائية ضوئية (Photovoltaics) تعطي جهداً كهربائياً (Voltage) وتدفقاً للتيار وتوفر قوة كهربائية عند امتصاصها لضوء الشمس.

لماذا تحجرت إذاً استراتيجيتنا في أمور الطاقة عند الفحم بدل تنعمها بنور الشمس؟

قد يكون لذلك بُعد سياسي ـ مصالح راسخة لمجهّزي الطاقة

الحاليين، لكن هناك أسباباً عملية أيضاً، فالعالم لا يتمتع بالطاقة الشمسية اليوم لأن الألواح الشمسية تكلف في إنشائها وتركيبها أكثر مما نحن مستعدون لدفعه.

إن شدة الشمس رغم كونها ليست بالقليلة إلا أنها ذات حدود، وإذا اعتبرنا هذا مع شهيتنا الشرهة للطاقة، فذلك يعني خلايا شمسية ذات مساحة واسعة لتلتقط مقداراً نافعاً من الطاقة. إن مساحة الألواح الشمسية تحدد السرعة التي يمكن لها فيها امتصاص أشعة الفوتونات المتسقة مثلما يقتنص فم الحوت الهائل كميات أكبر من العوالق (Plankton) مقارنة بفم سمكة السardين. علينا أن ننفتح بطريقة شاسعة. لكن متطلبات الألواح الشمسية لتغطية مساحات واسعة لا تتطلب جعلها مكلفة ومعقدة. ورغم أن عشر الواحد في المئة من مساحة الأرض هو مساحة واسعة يجب تغطيتها بمواد ممتصة للضياء إلا أننا قد فعلنا مثل ذلك الآن، فأمريكا قد غطت أو رصفت ما هو أكثر من هذه النسبة من مساحتها.

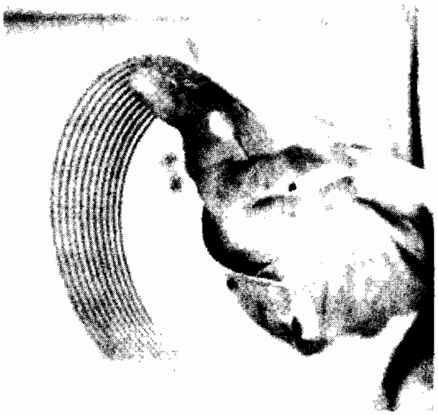
قد نستطيع بدل ذلك فرش سجاد شمسي عبر صحاري أريزونا أو نصبغ رمال نيومكسيكو لكي نقتنص النور.

طباعة الخلايا الشمسية

تستخدم الرقاقات الصلبة المسطحة من المواد شبه الموصلة النقية الصرفة لعمل الخلايا الشمسية من النوع التقليدي. وتتمكن هذه العدد السيليكونية بعد عقود من الجهد البحثي والهندسة من تحويل نحو 20 في المئة من الطاقة الساقطة من الشمس طاقة كهربائية. ولو كانت هذه الرقاقات رخيصة ويسهل التعامل معها، فإن هذه الكفاءة تعتبر أكثر من كافية. لكن الألواح الشمسية من شبه الموصلات تنتهي كألواح زجاجية. ويجب إنماء البلورات في درجات حرارة عالية داخل

ظروف فراغ صرفة. ويجب تصنيعها بعناية ونظافة فائقتين.

أما الآن فقد بدأ التقنيون النانويون بالإقلاع عن أشباه الموصلات البلورية الكبيرة النقية. وهم يقومون ببناء خلايا شمسية مرنة (انظر الصورة). وكالصحف، تتم طباعة هذه الفولطائية الضوئية (Photovoltaics) منسوجة من دون درز من لفة إلى لفة. وطريقة العمل قابلة للتوسيع، فإذا ما استطعنا صناعة قدم طولي من الورق الشمسي فستتمكن من صناعة ميل منه. وهذه الخلايا سهلة النقل والاستخدام. ويمكن حتى أن تصبح جزءاً من الألبسة، فبلوزة سوداء اللون تمتص اليوم من ضياء الشمس ما يكفي لإنارة مصباح أو لإعادة شحن بطارية، فلماذا لا نستغل هذه الطاقة بشكل كهرباء بدل حرارة لوحدها؟



خلية شمسية من اللدائن

إن أحد الأساليب الأساسية هي اللدائن الناقلة للكهرباء التي اخترعت في السبعينيات. وهذه مواد خفيفة ومرنة ورخيصة ويسهل العمل بها. واللدائن تصنع من سلاسل جزيئية طويلة ـ البوليمرات ـ التي يعطيها التفافها على بعضها قوتها ومرونتها المدمجتين. كنا نربط البوليمرات يوماً مع إطارات عجلات السيارات والأواني المنزلية

والبوليستر (Polyester) وهو أساس الإبداع والأناقة في منتصف القرن العشرين في أمريكا الشمالية. وكانت خواص البوليمرات اللاكهربائية هي التي ثمنت، فقد استخدمت لصنع الأغلفة العازلة للأسلاك الكهربائية بالاستفادة من رفض البوليمر العنيد لنقل الكهرباء.

ثم قام آلان هيغر (Alan Heeger) وزملاؤه في جامعة كاليفورنيا في سانتا بربارا في السبعينيات باكتشاف نقل الكهرباء في البوليمرات، فالإلكترونات يمكن أن تسري عبر السلاسل لبعض أنواع الجزيئات، إذ قام آلان هيغر بملاحظة الطبيعة للحصول على أصغر سلك يمكن تصوره وقطره يقل عن نانومتر واحد. ويمكن أن تعمل هذه الجزيئات مثل المعادن أو مثل أشباه الموصلات. وكانت الجزيئات المعدنية مثل جداول الماء الجبلية، ودمجت المادة المصنوعة من شبكة من هذه الجزيئات الجداول لتصنع نهراً من التيار الكهربائي. أما البوليمرات شبه الموصلة فكانت أطوع في التحكم وأكثر انقياداً. وكانت أصناف محددة من الإلكترونات، أي تلك التي تمتلك طاقة تقع ضمن مديات معينة، قادرة على السريان. وعملت أشباه الموصلات هذه مثل كدس من الأنابيب بدل أنهار عميقة من البوليمرات المعدنية.

ولكي يساهم الإلكترون في تدفق التيار، كان يجب أن يرفع إلى علو يناسب أنبوباً متوفراً. ولم تتمكن الإلكترونات من المساهمة في عملية النقل. وكان البوليمر شبه الموصل أكثر في تمييزه بكثير من المعادن في التحكم بجريان الإلكترونات. وقد أعطى ذلك الباحثين التحكم الذي كان مطلوباً ليفصلوا خواص امتصاص الضوء لعمل خلايا ضوئية من اللدائن. إن فجوة النطاق الموجي ـ أي المجال غير الناقل الذي يفصل الأنابيب الناقلة ـ تتحكم بكيفية تفاعل المادة مع الضوء.

إن كفاءة حصاد قوة الشمس يعتمد على استخلاص أكبر كمّ

ممكن من كل جسيمة من جسيمات الضوء، ويمتلك شبه موصل ذي فجوة ملائمة في النطاق الموجي إمكانية اقتناص الحد الأعلى من طاقة الفوتونات الثمينة، فجسيمة الضوء الحاوية على كم كافٍ من الطاقة يمكن أن ترفع طاقة الإلكترون إلى مستوى أعلى. ويختفي الفوتون فاقداً طاقته التي اكتسبها الإلكترون. ولا يقتصر ذلك على إدخال الإلكترون في أنبوب جديد ذي مستوى أعلى يستطيع من خلاله نقل الكهرباء، بل يوجد كذلك مجال في أنبوب ذي مستوى أوطأ، أي ثقب يمكن له أيضاً نقل الكهرباء. لذا، فإن ميل النظام لنقل التيار الكهربائي يتغير نتيجة امتصاص الضوء. إن التمكن من النقل بسبب الضوء هي خطوة نحو الخلية الشمسية لكن الأداة مازالت بحاجة إلى بطارية لتحريك الإلكترونات نحو التحرر. إن ذلك يعمل على تحسس الضوء لكنه لا يحصد الطاقة. إن المتحسس الضوئي هو مختلس للنظر، أو خصيّ يرمق الفوتون بنظرة غرامية لكنه لا يمتلك المطلوب لإغوائه، فالخلية الشمسية تلتهم الضوء، وهي تولد فولطية مستخدمةً الطاقة التي توفرها الشمس وتدفع بتيار ليتدفق. ويتم ذلك من خلال بناء انحراف داخل النظام، فمثلما ينحدر سفح الجبل ليدفع بالماء إلى الأسفل يستخدم في الخلايا الشمسية اللدائنية نوعان مختلفان من المعادن للتماس مع طبقة اقتناص الضوء، وتتجه الإلكترونات نحو المعدن ذي الطاقة الأوطأ منتجة بذلك سرياناً للتيار وتوليداً للطاقة الكهربائية.

وساهم ذات العالم، أي آلان هيغر، الذي اكتشف الانتقال الكهربائي في البوليمرات، باختراق رئيسي آخر في الخلايا الشمسية باستخدام التقنية النانوية. كانت الخلايا الشمسية لغاية التسعينيات غير كفوءة، لأن الإلكترونات فقدت طاقتها قبل أن يمكن جمع الطاقة، فقد قامت الفوتونات بإطلاق الإلكترونات من مقاعدها المريحة نحو

السقف، لكن الإلكترونات سرعان ما كانت تعود إلى مواقع الكسل قبل التمكن من تسخير الطاقة المتزايدة لديها. وتحصل هذه العملية غير المرغوب فيها لاسترخاء الإلكترونات عند توفر (كرسي مريح) فارغ فقط، فالإلكترون المستثار لن يجلس في المعقد الوثير إلا إذا كانت زوجته لا تشغله آنذاك.

الإلكترونات هي جزء من عائلة من الجسيمات أعطيت اسم الفيزيائي الإيطالي إنريكو فيرمي (Enrico Fermi) أبو القنبلة الذرية. وتمتلك الفيرمينوات (Ferminos) خاصية مانعة، فإن اثنين منها لا يتمكنان من احتلال نفس المقعد في نفس الوقت. ولأن عملية الاستثارة تخلق إلكتروناً وثقباً لذا تكون الكراسي المريحة متوفرة في زمن وموضع اكتساب الإلكترونات للطاقة، وسيتمكن الجميع بصورة سريعة من الحصول على مقاعد. وما إن تستقر الإلكترونات في مقاعدها ستكون قد تخلت عن طاقتها المكتسبة بشكل حرارة تعطيها إلى مقاعدها المريحة. وهذا سيدفئ الكرسي للإلكترون التالي الذي سيقدم ويجعل الاسترخاء أكثر جاذبية.

وعلى العُدد الفولطائية الضوئية بدل ذلك استخلاص طاقة الإلكترونات المستثارة قبل حلول الاسترخاء. ويتضمن أحد الحلول وضع مراوح في زاوية الغرفة لطرد الإلكترونات المستثارة بأسرع فرصة ممكنة. لكن توفر الكراسي الوثيرة تحت الإلكترونات أغراها لسوء الحظ لترتمي إلى الأسفل حتى عند وجود نسيم قوي. نتيجة ذلك لم يتيسر النجاح في الخلايا الشمسية اللدائنية المبكرة إلا في تسخير الطاقة التي يحملها واحد من كل عشرة آلاف فوتون يتم امتصاصه. وسلك هيغر طريقاً مختلفاً لحل المشكلة، فمع إدراكه لكون الكراسي الوثيرة مغرية، قام بإدخال إغواء آخر للإلكترونات المستثارة من خلال تجهيز غرفة معيشة لا تحتوي على مقاعد مريحة

وحسب بل ثريات أيضاً، وحث إلكتروناته المستثارة للتأرجح من ثريا إلى أخرى، يساعدها في ذلك النسيم. وبقيت إلكترونات هيغر مستثارة، وأمكن حصاد طاقتها ما أن قامت بالتأرجح شاقّة طريقها خارج الغرفة.

ورتب هيغر الأثاث بحيث لم توضع أي ثريا مباشرة فوق مقعد مريح.

وأكد هيغر بهذه الطريقة، طريقة تقليل الإغراء للإلكترون لكي يرتمي في مقعد مريح، أن الإلكترونات إذا ما استغرقت التأرجحات الطرزانية عبر غرفة الجلوس برهة لا بأس بها، فإنها لن تقع تحت تأثير إغواء الكراسي المريحة. وحافظ على إلكتروناته بهذه الطريقة مستثارة واستطاع استخلاص قدر أكبر بكثير من طاقتها.

وكانت مقاعد هيغر المريحة هي البوليمرات، أما الثريات فهي «كُرات باكي»، وهي جزيئات مكونة من ستين ذرة كاربون تشبه كرة القدم وذات حجم نانوي.

وتلتجئ الإلكترونات إلى كُرات باكي، فما أن يستثار الإلكترون في البوليمر حتى يقفز إلى «ثريا باكي» في أقرب فرصة، أي في أقل من واحد من التريليون من الثانية.

وبذلك حسن هيغر الخلايا الضوئية بعامل يبلغ المائة، فمن كل مئة إلكترون تتم استثارتها استطاعت ثلاثين منها أن تتأرجح لتندفع خارج الغرفة وهي مازالت تحمل الطاقة.

وقادت نجاحات هيغر الباحثين الآخرين نحو اختراقهم التالي في مجال حصاد الفوتونات بطريقة أكثر كفاءة، فإذا ما كان بالإمكان جعل الثريات مغرية بهذه الدرجة إنما صعبة المنال، فهل من الضروري على وجه الدقة إتاحة مخرج مباشر للإلكترونات لترك الغرفة؟

أو ـ مع توفر رفاهية في الوقت والمجال من خلال طرق مختلفة للهروب للإلكترونات والثقوب ـ يمكن للخلايا الشمسية أن تصنع بحيث تجول فيها الإلكترونات خلال متاهة متعرجة نحو هروبها النهائي؟ وتعلمنا البيولوجيا قيمة التعرج، فأمعاؤنا على سبيل المثال متموجة، وهي تمتلك نتيجة لذلك رغم صغر حجمها مساحة واسعة جداً للتفاعل الكيميائي.

إن الممرات المتعرجة لامتصاص المغذيات في الطعام تعطينا أفكاراً عن وسائل مشابهة لامتصاص الطاقة بطريقة كفوءة من الإلكترونات المستثارة. وسيحدث الفعل في كلتا الحالتين على مستوى الالتقاء ـ كيمياء الهضم في أمعائنا وامتصاص طاقة الإلكترونات في الخلايا الشمسية ـ ويعزز توفر المساحة هذه العملية. وتستخدم الإسفنجيات والمحول الحفاز لعادم السيارة ومرشحات الماء نفس القاعدة.

لقد استعار مايكل غريتزل (Michael Grätzel) هذه الاستراتيجية الهندسية الطبيعية(1)، إذ أدرك في بحوثه في المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا في سويسرا بأن خلية شمسية مسطحة لم تكن كفوءة عندما كان كل العمل يحدث على مستوى الالتقاء. لذا قام بصنع خلية ضوئية جزيئية تعتمد على وقوع مزدرع الإلكترون ـ الثقب بالضبط عند نقطة الاتصال بين مادتين. لكن إذا ما كانت طبقة واحدة فقط من جزيئاته عالية الامتصاص تقع على سطح مستوى الالتقاء فإن القليل من الضوء سيتم امتصاصه. ستكون العملية مثل محاولة تنشيف

---

(1) U. Bach, «Solid -State Dye - Sensitized Mesoporous TiO2 Solar Cells with High Photon - to - Electron Conversion Efficiencies,» *Nature*, vol. 395 (8 October 1998), pp. 583-585.

شلالات نياغارا بقطعة من المناشف الورقية الاعتيادية.

وقام غريتزل بتصغير قياس فكرة الإسفنجة/ الأمعاء إلى المقياس النانومتري، وبذلك صنع أداة مملوءة بالجزيئات الصبغية الممتصة لأشعة الشمس كانت كل جزيئة صبغية فيها تقع على مستوى التقاء. وكانت أداة غريتزل ذات بنية نسيجية نانوية. ودفعت خليته الشمسية بالأرقام القياسية السابقة للخلايا الضوئية المستندة إلى الجزيئات العضوية جانباً، وأعطتنا خلايا شمسية تتجاوز كفاءة التحويل للطاقة الشمسية ـ إلى ـ كهربائية فيها 10 في المئة. وعند هذا المستوى من الكفاءة فسوف لا نحتاج إلا لتغطية عشر الواحد في المئة من مساحة الأرض بالخلايا الشمسية لتلبية متطلباتنا للطاقة.

وتمتلك خلايا غريتزل الكثير من الشبه بعملية التركيب الضوئي التي يتمكن النبات بواسطتها من اختزان الطاقة، فالنباتات تستخدم الكلوروفيل، وهو صبغة تجعلها تبدو خضراء في حين استخدم غريتزل صبغات مصممة خصيصاً. لماذا لا نسير الطريق كله ونستخدم كلورووفيل النباتات كصبغة؟ إن النباتات تمتلك أفضلية ملايين السنين من التطور قامت خلالها بتحسين كفاءتها التي تمتص بواسطتها فوتونات الشمس إلى حد الكمال. إن نبات السبانخ كفوء وينتج كمية كبيرة من الطاقة مقارنة بحجمه ووزنه. وهو ـ لمنفعة البيئتين ـ أخضر بدون أي جدال. وقد قام مارك بالدو (Mark Baldo) وزملاؤه في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا مؤخراً بتنقية المكون الفعال الذي يقوم بحصاد ضوء الشمس في السبانخ، فقد قاموا بهرس السبانخ العادي وعزلوا عشرة أنواع من البروتينات في خلايا النبات بأحجام نانوية، ووجدوا طريقة لتوحيد البروتينات الرطبة عادة مع الإلكترونيات الجافة المطلوبة عادة لتشغيل الأجهزة. ومازالت بروتينات السبانخ التي فصلها بالدو وزملاؤه غير قادرة على تهديد

كفاءة صبغات غريتزل. وما هو أفضل من ذلك أن الطريقتين قد تجمعان لصنع خلايا غريتزل الكفوءة عالية الامتصاص التي تكتسب تحسسها باستخدام قوة سبانخ بالدو.

وقد قهر الباحثون في سنة 2005 تحدياً آخر في حقل الخلايا الشمسية، فبوليمرات هيغر وصبغات غريتزل وسبانخ بالدو تستطيع حصد نسبة جيدة من الضوء الذي تمتصه لكنها تمتص ألوان الطيف التي نراها بأعيننا. أي إن هذه الأدوات «ترى» نصف طاقة الشمس التي تصل الأرض فقط. ويكمن النصف الآخر من طاقة الشمس في المنطقة تحت الحمراء،وهي أطوال موجية غير مرئية بالنسبة لنا لكنها حقيقة وبذات قوة الضوء المرئي.

إن أي جسم دافئ في الحقيقة ـ ولا داعي لأن يكون ساخناً إلى درجة التوهج ـ يبعث أشعة تحت الحمراء محمَّلة بالطاقة بتقليد ذي مقياس صغير لإنتاج الضوء من قبل الشمس. إن الحافة الخارجية للشمس تمتلك درجة حرارة تبلغ 5500 درجة سيلسيوس. وفي فصل سابق من تاريخ ميكانيكا الكم لم يكن بالإمكان فهم العلاقة بين درجة الحرارة لجسم ساخن والألوان والقوى التي أنتجها بطريقة صحيحة إلا من خلال البصيرة الثاقبة لماكس بلانك (Max Planck) وألبرت إينشتاين في ما كان يعرف بكارثة فوق البنفسجية (Ultraviolet Catastrophe)، فقد فهما ألوان الشمس وقوتها من خلال افتراض الطبيعة المتميزة لجسيمات الضوء إضافة إلى طبيعتها الموجية وكانت تلك قفزة كمية للفيزياء البصرية.

وكان من المعروف حتى قبل أن يتم وضع الحل للكارثة بوجود علاقة مباشرة بين درجة حرارة الجسم الساخن وألوان الضوء الذي ينتجه، فالشمس التي تتوهج عند درجة 5500 درجة سيلسيوس تنتج طيفاً عريضاً أبيض ـ أصفر من الطاقة يقع حده الأعلى في اللون

الأخضر. وتمتص النباتات اللون الأحمر عاكسة الأخضر بسبب في لون أوراقها. لكن الاستراتيجية اللونية التي تبين كيف ربحت أو خسرت الباكتيريا مختلفة الألوان معركتها للحصول على الضوء في العصور قبل التاريخ تبقى مسألة تخمين.

إن فرناً يعمل بدرجة 1000 سيلسيوس ـ وهو ساخن لكن لا يقارب الشمس بحرارته ـ يبعث أشعة تقع معظمها في المنطقة تحت الحمراء. وترغب القوة البحرية الأمريكية في تحويل الحرارة المولدة في قلب المفاعلات النووية للغواصات مباشرة وبطريقة صامتة إلى قوة كهربائية مستخدمة مواد فولطائية ضوئية تمتص الأشعة تحت الحمراء متجاوزين بذلك الطوربينات البخارية المستخدمة اليوم، ففي داخل مفاعل عملي لغواصة، أو قدر تعلق الأمر بأي فرن، ستنصهر جدران الفرن إذا ما وصل درجة حرارة 5500 سيلسيوس. لكن وفرة من الأشعة تحت الحمراء ستنتج وتكون جاهزة للحصد في درجة 1000 سيلسيوس الأكثر واقعية.

لذا فإن الفولطائية مطلوبة بحيث تتمكن من اقتناص الأشعة تحت الحمراء أيضاً وليس الضوء المرئي فقط. وقد أظهرت مجموعتي في جامعة تورنتو في سنة 2005[2] أننا نستطيع تحويل القوة تحت الحمراء إلى كهرباء في خلية شمسية قابلة للتلوين. وقمنا باستخدام نقاط الكم وهي جسيمات شبه موصلة مصممة لامتصاص ألوان محددة من الضوء تحت الأحمر وسخرت بطريقة فولطائية ضوئية الأطوال الموجية التي لم تكن ممتصة والتي تقع في ما وراء

(2) S. A. McDonald [et al.], «Solution - Processed PbS Quantum Dot Infrared Photodetectors and Photovoltaics,» *Nature Materials*, vol. 4 (9 January 2005), pp. 138 -142.

تلك التي نستطيع رؤيتها. وقمنا بتفصيل أقطار الجسيمات النانوية بحيث إن المواد بدأت تمتص في أي موقع على مدى واسع من طيف اللون تحت الأحمر. ويمكن بذلك تنظيم الخلايا لتلائم حرارة فرن محدد أو مصباح حراري محمول، أو الذيل تحت الأحمر للقوة القادمة من الشمس.

وقد قهر البحث في موضوع الخلايا الشمسية الكبيرة المرنة عدداً من التحديات في صنع خلايا كفوءة وقابلة للتشكيل حسب رغبة الزبون. وعلى الباحثين أن يبينوا أن مواد تصاميمهم الجديدة يمكن أن تصنع على مجال واسع المطلوب إذا ما كنا سنقوم باستقطاع ولو جزء يسير من استهلاكنا للوقود الأحفوري. وقد قامت عدد من الشركات الآن بتولي هذه المسؤولية. إن هذا المزيج من المنافع الهائلة والتحديات العملية البارزة التي تواجه الفولطائيات الضوئية المرنة يلخص فرصة النانوتكنولوجيا في السنين القليلة القادمة. وعليها أن تبين أنها ليست فقط مدهشة وجميلة ومعززة للأداء بل إنها لا تقاوم أيضاً.

وعندما تؤخذ سهولة التصنيع والاقتصاد والعوامل الإنسانية بالحسبان سوية يجب أن تبقى ثمار براعة التقنيين النانويين باهرة.

إطلاق الطاقة المختزنة

تقتنص الخلايا الشمسية بصورة مباشرة المصدر الخارجي الظاهري الوحيد للطاقة التي تصل إلى الأرض وهي ضوء الشمس. لكن علينا أن نفعل ما هو أكثر من الاقتناص. علينا أن نختزن تلك الطاقة كما نصر على أخذها معنا عندما نتحرك، فعندما تغرب الشمس سنريد أن تستمر ساعاتنا تشتغل. وعندما يزيد دفقه من الطاقة أكثر مما توفره الشمس ـ مثلما نريد عندما نذهب إلى مكان ما بسرعة

خمسة وسبعين ميلاً في الساعة في يوم غائم، سنحتاج إلى طاقة مختزنة. إننا نرغب في نقل الطاقة عبر الزمان والمكان.

إن قوانين الفيزياء تصر على أن كل ما نستطيع فعله هو تحويل الطاقة من نوع إلى نوع آخر، ولا يمكننا خلق شيء من لا شيء. وحصاد الطاقة هو نوع من التحويل بين هيئات مختلفة ـ الفوتونية والإلكترونية والحركية والحرارية والكيميائية والجذبية ـ وليس عمل اختلاق جديد أو عمل تدمير. ولا توجد الكيمياء السحرية إلا في توليد الطاقة النووية حيث يحدث تحول سحري للمادة إلى طاقة حسب المعادلة ($E = mc^2$).

وتمثل أنواع الوقود الأحفوري ـ الطاقة المختزنة كيميائياً ـ نفس قاعدة الحفاظ على الطاقة، فقد حصد الغطاء النباتي قوة الشمس يوماً ما من خلال عملية التركيب الضوئي وحول الطاقة بعد ذلك إلى نفط أو فحم أو غاز طبيعي، فالوقود الأحفوري ليس إلا طاقة شمسية تم الاحتفاظ بها بشكل كيميائي. ما هي المشكلة إذاً في الطاقة الشمسية التي تحتفظ بها الخضروات المتعفنة؟ المشكلة ليست في طريقة الإنتاج إنما في النواتج العرضية مثل ثاني أوكسيد الكاربون، أي غاز الدفيئة الكونية الذي يتم إطلاقه عند تحويل الطاقة من هيئة إلى أخرى.

وما هو المغري في أنواع الوقود الأحفوري؟ إن الوقود الذي نحرقه في سياراتنا فيه بعض الخواص الرائعة، فإذا ما حكمنا عليه من حيث الطاقة المتوفرة في وحدة الوزن أو الطاقة المتوفرة في وحدة الحجم نجده ذا طاقة كبيرة وحجم صغير، لذا فإنه سهل النقل. إن مقياس الطاقة في وحدة الوزن مهم بالنسبة لنا: فنحن لا نرغب في إثقال سياراتنا بعديد من أطنان الوقود، فما أن نملأ خزانات سياراتنا نشعر بالسعادة لأن وزن السيارة لم يزدد إلا قليلاً.

والطاقة المتوفرة في وحدة الحجم مهمة أيضاً: فكفاءة الوقود الحجمية تؤمن كون حجم خزانات وقود سيارتنا صغيرة مقارنة بحجم السيارة الكلي.

وهذا ليس دفاعاً عن استخدام أنواع الوقود الأحفوري لكنه بالأحرى تحديد لأسباب بقائنا مدمنين عليها كنوع من أنواع الطاقة القابلة للحمل.

وما أن نستطيع تحديد المكونات التي تساهم في ارتباطنا بالبنزين، فربما نتمكن من فك دائرة ارتباطنا. تساعدنا مميزات الكفاءة الحجمية والكتلية في التفهم الجزئي لماذا علينا الانتظار لكي نتزحزح عن استخدامنا الطاغي للبنزين.

وهي تشخص مؤشرات للمقارنة مع بدائل اختزان الطاقة النظيفة.

وهناك إضافة إلى التلوث الذي يحدث عند استخدام الطاقة عائق إضافي يسجل ضد الوقود الأحفوري. سيأتي عما قريب وقت يصل فيه استخراجنا لهذه الأنواع من الوقود من الأرض قمته وستزداد كلفته نتيجة ذلك. وعندما يحدث ذلك سنشعر بصورة متزايدة بالحاجة الملحة لاقتناص وخزن الطاقة بجهودنا فقط بدل الاعتماد على تركة الطبيعة من الوقود الأحفوري. لقد كنا نعيش حتى الآن على طاقةٍ مستعارةٍ.

وتوفر كل من خلايا الوقود والبطاريات وسائل لخزن الطاقة، فخلايا الوقود الهيدروجينية تستهلك وقود الهيدروجين مع الأوكسيجين الذي تحصل عليه من الهواء. وهي تنتج الطاقة وكذلك الماء كمنتوج عرضي ـ أي كمنبعثات نظيفة. وتقوم خلايا الوقود بتحرير الطاقة المختزنة ـ أي طاقة جاءت من موقع آخر. وإذا ما كان الوقود الهيدروجيني منتجاً بواسطة الطاقة المقتنصة من أشعة الشمس

فستكون الخلية شمسية نظيفة أما إذا كان الهيدروجين مستحصلاً من حرق الفحم فالخلية ليست إلا بنظافة الفحم. وخلايا الوقود هي في الحقيقة ساندويشات لها نقاط تماس كهربائية على السطح والقعر وهناك في الوسط مادة مصممة بحيث تسمح لخلايا الهيدروجين بالسريان. ويتم إدخال الهيدروجين من إحدى جهتي الساندويش ويدخل الأوكسيجين من الطرف الآخر. وتفصل ذرات الهيدروجين إلى بروتونات ـ وهي نوى ذرات الهيدروجين ذات الشحنة الموجبة ـ وإلى إلكترونات.

وتنزح البروتونات خلال الجزء الأوسط من الساندويش لتصل إلى الطرف الثاني حيث تلتقي بالأوكسيجين منتجة الماء والحرارة. أما الإلكترونات فتصل إلى الطرف الثاني للساندويش من خلال طريق منفصل وهو الطريق الذي تحصد فيه الدائرة الكهربائية طاقتها. إن لب الساندويش (أي الطبقة الوسطى) ذو أهمية حاسمة من خلال أدائها في نقل البروتونات. لقد قام الباحثون من خلال إعطاء الأغصان المتفرعة من جذع الجزيئة التي تشكل هذا البوليمر الطول الأمثل بهندسة هذه المادة لنقل البروتونات بكفاءة. وقام المهندسون الكيميائيون بإضفاء قوة على جذع هذا البوليمر فأعطوه ثباتاً ميكانيكياً وكيميائياً وحرارياً.

وتحتاج خلايا الوقود إلى عامل حافز أيضاً وهو مادة كيميائية تعمل وسيطاً لفصل وقود الهيدروجين إلى بروتون وإلكترون منفصلين. ويأتي الأداء الأفضل من عنصر البلاتين لكنه غالي الثمن. وقد قام الباحثون مؤخراً ببناء جسيمات نانوية من البلاتين للوصول إلى الحد الأعلى من المساحة السطحية المعرضة من ما قيمته دولار واحد من البلاتين. وقد برهنت هذه الهندسة على المقياس النانوي على كفاءة بحيث إن كمية البلاتين اختزلت إلى الربع دون التنازل عن

الأداء أو المدى العمري. وتصل الكفاءة الكهربائية بخلايا الوقود اليوم إلى 60 في المئة. وخلايا الوقود جذابة كمصدر للنباتات التجارية وللبيوت وللأجهزة النقالة إضافة إلى السيارات وذلك لأنها لا تنفث إلا الماء النظيف. تصور أنك بدل أن تعيد شحن بطارية حاسوبك المحمول ستقوم بملء كارت تخرين الهيدروجين فيه.

توليد الوقود الهيدروجين

الهيدروجين هو أكثر العناصر ابتذالاً على كوكب الأرض، لكن الهيدروجين الجزيئي المستخدم في خلايا الوقود غاز يصعب الإمساك به، فهو خفيف إلى درجة تجعله ينطلق إلى أعلى في الجو لتحل غازات أثقل مثل الأوكسيجين والنايتروجين محله.

وهكذا فرغم ابتذال الهيدروجين لا نجده متوفراً بسهولة بالهيئة التي نحتاجها للاستخدام في خلايا الوقود. إننا محاطون به لكنه مغروس في الماء أو في الهيدروكاربونات.

والماء ذو جزيئة مستقرة واطئة الطاقة وهو الناتج وليس الجزء المقوِّم في تفاعل خلية الوقود. والوقود الذي يجب استهلاكه والذي تتحرر الطاقة منه يجب أن يكون أكثر نشاطاً وأكثر فاعلية من المنتوج.

كيف ننتج وقود الهيدروجين المطلوب؟ تعتمد إحدى الطرق الكفوءة البسيطة على شطر الماء باستخدام الطاقة الكهربائية لتنتج غاز الهيدروجين.

يمثل هذا كفاءة في الطاقة فهو يحول الكهرباء إلى طاقة كيميائية مختزنة. وإذا ما كانت القوة الكهربائية مستمدة من الشبكة الكهربائية فإن شطر الماء بنفس أمان أو عدم أمان، وبنظافة أو عدم نظافة

الطريقة المستخدمة في توليد الكهرباء أكانت من مساقط الماء أو الذرة أو الفحم أو الريح أو الشمس.

وقد عرض مايكل غريتزل مؤخراً التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى هيدروجين للاستخدام في خلايا الوقود، فقد كان بإمكان غريتزل حتى بدون بناء وسائل جديدة أن يستخدم واحدة من خلاياه الشمسية الكفوءة لإنتاج الكهرباء بكفاءة تبلغ 10 في المئة ويقوم بواسطته بتوفير القوة لشطر الماء لإنتاج الهيدروجين. ويمتلك النظام ككل كفاءة تبلغ 7 في المئة. وبدلاً من ذلك استخدم غريتزل الضوء لإنتاج الهيدروجين مباشرة وبمرحلة واحدة بدل تتابع لخطوات منفصلة. (وستكلف آكلة الريزوتو(*) (Risotto) وقتاً وجهداً أقل إذا ما استطاع المرء أن يقلي الخضار ويطبخ الرز في عملية متناسقة واحدة). قام غريتزل بتسخير الطاقة المحتواة في جسيمتين مختلفتي اللون من الضوء لشطر الماء. ولأن شطر جزيئة ماء واحدة احتاج طاقة أكثر من تلك المتوفرة في فوتون مرئي واحد قام غريتزل بالربط بين نظامين لحصر الضوء. قام الجزء الأول بامتصاص الضوء الأزرق من الشمس بينما قام الجزء الثاني باستخدام القسم الأحمر والأخضر. إن مجموع الطاقة في هذين الجزأين من النظام وفي الطيف الشمسي مكنتها من إنتاج الهيدروجين.

قام غريتزل بهذه الطريقة بإنتاج هيدروجين جزيئي ملائم للاستخدام في خلايا الوقود من خلال الشطر المباشر لجزيئة الماء. وكانت كل الطاقة المستخدمة قادمة من الشمس. ويمكن لهذه الطريقة مبدئياً أن تعطينا أداة كفوءة محتواة ذاتياً. وقامت أداة غريتزل بتحويل نور الشمس إلى طاقة كيميائية بكفاءة بلغت 4,5 في المئة، وهو أمر

(*) الريزوتو هي أكلة إيطالية تمزج فيها الخضار واللحم مع الرز.

واعد لكنه لم يقترب حتى الآن إلى العشرات بالمائة الممكنة. ولم يكن أسلوب غريتزل للفوتونين مستحدثاً كلياً من دون سابقة:

إن طريقته الشمسية لشطر الماء تقلد طريقة التركيب الضوئي الطبيعية في النبات.

نقل الطاقة عبر الزمان والمكان

أما وقد حصلنا على الهيدروجين الآن فكيف سنستخدمه؟

لقد أنعش الوقود الأحفوري توقعاتنا من حيث مجال الخزن، فإعادة ملء خزان وقود السيارة عملية سهلة وأمينة نسبياً ويحشد البنزين كمية كبيرة من الطاقة من حيث حجمه ومن حيث كتلته، وبهذا لا يكون خزان الوقود أكبر أو أثقل من السيارة. والهيدروجين الجزيئي النقي كفوء لحسن الحظ قدر تعلق الأمر بالكتلة: ففي حين تحرق السيارة الحديثة 50 باونداً من البنزين لتسير مسافة 250 ميلاً نجد أن 10 باوندات من الهيدروجين ستؤدي نفس المهمة. لكن ما يعوق الهيدروجين هو ميله للتمدد، فلو أن هذه الكمية من الهيدروجين اختزنت تحت ضغط جوي عادي وفي درجة حرارة الغرفة لملأت بالوناً قطره 15 قدماً. ومن سوء الحظ أن شاحنة المثلجات وتجارة المناطيد ليست ضمن اهتمامات شركة جنرال موتورز (لإنتاج السيارات).

نستطيع كبس الهيدروجين لنعتصره في حجم أصغر بمساعدة الضغط.

ونتمكن أن نحتجز باوندات العشر من الهيدروجين مثلاً في خزان بسيط رخيص الثمن من الصلب لكن حجمه سيبلغ خمسة أضعاف خزان وقود سيارات اليوم.

وتصنع خزانات الضغط العالي اليوم باستخدام المواد المدمجة المقوّاة بألياف الكاربون مختصرة الحجم إلى النصف. ومن الممكن تصنيع خزانات تعمل بضغط أعلى وتحصر كمية أكبر من الوقود في حجم محدد لكنها تثير عدداً من التحديات.

إن وضع غاز تحت ضغوط هائلة عملية خطرة تتضمن احتمالية الانفجار، وفي اليابان يمنع وضع الخزانات العاملة بمثل هذه الضغوط من الطرق العامة.

ولما كان البنزين يختزن كسائل فلماذا لا نفعل الشيء ذاته بالنسبة للهيدروجين؟ وهذا يمكن عمله وهي عملية كفوءة جداً من حيث استغلال الحجم لكن يجب الحفاظ على الخزان في درجة حرارة 425 فهرنهايت تحت الصفر (251 سلسيوس تحت الصفر تقريباً). ويقوم نفس الهيدروجين المسيل بإطلاق مكوك الفضاء ومع ذلك فإن المقارنة بسجل سلامته والكلفة للمركبة الواحدة ستثير قلق مدراء مصانع السيارات. ورغم ذلك فإن شركة **BMW** قامت بإنشاء محطة تعبئة بالهيدروجين المسيل تعمل أوتوماتيكياً وأظهرت إمكانية تشغيل السيارات بالهيدروجين. ويجب التحكم بالفقدان الناجم عن التبخر، وقد تم إنقاص ذلك إلى حدود 1 في المئة من كتلة الهيدروجين في اليوم الواحد. لذا فإن ترك السيارة لمدد طويلة في المطارات (عندما يسافر مالك السيارة) يبدو بعيد المنال في مثل هذه الظروف.

وقد توفر التقنية النانوية حلاً مشوقاً لمشكلة فقدان الهيدروجين، فمن الممكن ضمن حالة كيميائية وضغط ودرجة حرارة ملائمة أن تجعل الهيدروجين يترسب على السطوح، فالمواد ذات المسامية النانوية تمتلك أكبر مساحة سطحية ممكنة في وحدة الحجم مثل زغب الأمعاء.

ومن ناحية أخرى لما كانت القوة التي تعمل على لصق الهيدروجين إلى سطح الخزان فعالة بالنسبة للطبقة الأولى من الجزيئات، فليس في الإمكان اختزان أكثر من طبقة واحدة. لذا فإن مساحات سطحية كبيرة جداً محتواة في حجم صغير هي المطلوب وتوفر المواد ذات البنية النانوية هذا الحل.

وتقول النظرية إن أربع ذرات هيدروجين يمكن في أحسن حالة لصقها على صفيحة مستوية من الكاربون تحتوي على عشر ذرات. ويمثل الهيدروجين في مثل هذا النظام للخزن 3 في المئة من كتلة النظام، أما بقية الكتلة فتمثلها صفائح الكاربون. ويمكن في درجات حرارة اعتيادية خزن 2 في المئة من الكتلة من الوقود. ويعزز ثني هذه الصفائح للحصول على أنابيب نانوية شديدة اللف القوى التي تجتذب جزيئات الهيدروجين محققة زيادة قدرتها 25 في المئة في كمية الهيدروجين المختزن. وهذه حجة أخرى في مصالح قدرة الإبهاج: اختزان الطاقة النانوية الممتلئ. ومن غير الواضح فيما إذا كان اختزان الهيدروجين باستخدام الأنابيب النانوية في المختبر قد أصبح عملية كفوءة. وأكثر النتائج لفتاً للنظر هو ادعاء لـ 6 في المئة إلى 8 في المئة من الخزان القابل للعكس، لكن هذه النتيجة لم يمكن تحقيقها باستمرار. أما قابلية الخزن بحدود 1 في المئة من الكتلة فقد تحققت.

ومازال الاختزان الكفوء للهيدروجين يمثل تحدياً. وعلى صناعة خلايا الوقود الهيدروجين علاوة على التعامل مع المسائل التقنية أن تواجه قضية تقبل المستهلكين، فكل من قد سمع بمأساة الهندنبرغ(*)

(*) الهندنبرغ (Hindenburg): منطاد ألماني أعطي هذا الاسم تيمناً باسم رئيس جمهورية ألمانيا باول فون هندنبرغ (1847 ـ 1934) واستخدم لنقل الركاب عبر الأطلسي وكان يملأ بغاز الهيدروجين، وفي إحدى سفراته بتاريخ 6 أيار/ مايو 1937 عند محاولته الهبوط في قاعدة بحرية قرب نيويورك التهب ودمرته النيران في ظرف 37 ثانية فقط.

(Hindenburg) يربط الهيدروجين بالموت حرقاً. أما دعاة خلايا الوقود الهيدروجيني، فيشيرون إلى أن الهيدروجين غير سام وخفيف إلى درجة تجعله يتطاير لحظوياً إذا ما انطلق من مخزنه.

وفي حين أن سيارة مثل فورد (موديل بنتو Pinto) تعمل بالبنزين ستبقى ملتهبة في نيران طويلة المدى، إلا أن سيارة تعمل بالهيدروجين ستقذف بذيل ملتهب عالياً في السماء إنما لفترة محدودة فقط. ومهما كانت الميزات المنطقية لهذه الحجج، فإن الأمر يتطلب من مصنّعي السيارات والمنتجات الاستهلاكية التي تستخدم وقود الهيدروجين المختزن إقناع زبائنهم ـ عقلياً وعاطفياً ـ بإيلاء هذه التكنولوجيا الجديدة ثقتهم. لذا يجب أن ينفذ الهيدروجين إلى قلوبنا وعقولنا قبل أن نوافق على تغلغله في أغشية التبادل البروتوني.

توفير الطاقة للمستقبل

هناك في قطاع الطاقة هوة هائلة موجودة بين حدود الإمكانيات المادية وواقع التكنولوجيا الحالية. هناك أساسيات معينة يجب أن يتم التقيد بها وأولها الحفاظ على الطاقة ونتيجتها الرئيسية هي أننا لا نستطيع الاستمرار بالاعتماد على مصادر الطاقة غير القابلة للتجديد. علينا أن نكون فعالين في اقتناص الطاقة بجهودنا. ولا يوجد عائق أساسي أمام تسخير قوة الشمس بطريقة كفوءة ولا من سبب يمنعنا من تحقيق ذلك بطريقة رخيصة. وقابلة للتكيف. ولا من حاجز كامن يمنعنا من اختزان وإطلاق الطاقة مع إطلاق مصاحب لبخار نظيف بدل غازات الدفيئة.

وإذا لم تكن هناك حواجز أساسية تمنعنا من تنظيف عاداتنا في ما يخص الطاقة فإن الابتكار يقدم لنا إمكانية الحل. وقد قامت التقنية النانوية بتطبيق أفكار من ميادين متباينة ـ فخلايا مايكل غريتزل على

سبيل المثال استلهمت البنى البيولوجية ذات التركيبة الواسعة السطوح والنباتات التي تقتنص الضوء وأضافت بصيرة نافذة من الكيمياء والفيزياء وعلم المواد والهندسة الكهربائية لإيجاد الحلول للتحديات التكنولوجية ذات الأهمية البالغة لعلاقة الإنسانية ببيئتنا الطبيعية.

الفصل الخامس
الحماية

على وكالات حماية البيئة أن تقوم باكتشاف الأخطار التي تهدد عالمنا الطبيعي بحاسمة شمها في أول فرصة مبكرة. وعليهم أن يقنعوا الملوِّثين المتوقَّعين بأنهم لن يفلتوا من المحاسبة على تجاوزاتهم:

ضع شَرَكاً للسرعة على كل تقاطع. وعلى الوكالات العسكرية والأمنية أن تبدي اهتماماً مماثلاً بتحسس ما في الهواء الذي نستنشقه والماء الذي نشربه، وعليهم أن يحذروا من الكيميائيات الخطيرة حتى في أقل مستوياتها وقبل أن تشكل هذه السموم خطراً على الصحة. ويجب أن ينفذ مثل هذا التحسس في زمن مبكر وموقع بعيد ليعطينا الفرصة لتجنب الخطر.

وعلى الصناعة أيضاً في الوقت ذاته إيجاد الوسائل للتحكم في الانبعاثات الناجمة عنها والتقليل منها. وهذا واحد من الميادين التي كانت التقنية النانوية تؤدي فيه دوراً حاسماً حتى قبل أن يصبح اسمها عام الاستعمال، فالزيولايتات التركيبية (Synthetic Zeolites)، وهي مواد مملوءة بمسافات متماثلة ذات حجم نانوي، قد وضعت قيد الاستخدام وحسنت نوعيتها في صناعة تكرير النفط لإنتاج البنزين الخالي من الرصاص: وذلك في عملية التهذيب بالعامل الحفاز

للتقليل من الانبعاثات الضارة بالصحة وكذلك لإنتاج مساحيق الغسيل الخالية من الفوسفات. وتعتمد الأنواع الجديدة من عوامل التثليج التي حلت محل المواد الكلورفلوركابونية (Chlorofluorocarons) التي تستنزف الأوزون على الزيولايت أيضاً.

ويستخدم التقنيون النانويون الجسيمات النانوية للإمساك بوثاق المعادن الثقيلة، مثل الرصاص والكادميوم (Cadmium) وفصلها عن مصادر مياهنا الجوفية لكونها مواد خطيرة. وقد تمت معالجة النفايات الخطيرة من محطة ثري مايل آيلاند (Three Mile Island) النووية(*) جزئياً باستخدام الزيولايت. إن محاولة تصحيح أخطائنا السابقة، أي التعامل مع تحديات استعادة عافية البيئة، يمثل حقلاً ناشئاً للتقنية النانوية وهو حقل يشهد استثمارات متميزة من وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة. وفي حين أن التقنية النانوية بدأت تستخدم للعناية بالبيئة إلا أنها تخضع لتحريات تخص الخطورة التي تمثلها مثل إطلاق الجسيمات النانوية في جداولنا وأنهارنا أو في الهواء. لذا، فإن دراسة الأثر البيئي للتقنية النانوية ووضع استراتيجية تنظيمية ملائمة أمر شديد الأهمية.

تفهُّم الأخطار التي تواجه البيئة

لو كانت حاسة شمنا مرهفة مثل حاسة شم الكلب، فإن الطفل سيشم رائحة أمه في غرفة أخرى، وسيعلم حراس الحدود أين تخبأ المخدرات في السيارة التي تمر وسيعلم الجندي الذي يعمل على تطهير حقل من الألغام موقع تلك الألغام. إن حدة حاسة الشم لدى

(*) ثري مايل آيلاند (Three Mile Island): هي محطة نووية لتوليد الكهرباء عانت في 29 آذار/ مارس 1979 حادثة كادت أن تتطور إلى كارثة نووية.

الكلاب تبرهن على إمكانية اكتشاف الجزيئات في مستويات تركيز ضئيلة جداً. وسيستفيد التحسس البيئي من هذه الإمكانية للاستشعار والتمييز بصورة هائلة، إذ ستمكنه من الاستجابة السريعة والقاطعة لأخطار مثل النفايات السامة في جدول يجري بجوار مصنع أو غاز الأعصاب الذي قد يطلقه إرهابيون.

وتتميز المتحسسات الكيميائية الموجودة اليوم بصعوبة حملها، إذ تحوي بطاريات تزودها بالقوة وتزن العديد من الباوندات. ويمكن أن تجعل هذه المتحسسات أكثر ملاءمةً، وحتى يمكن أن يلبسها الشخص. وكيف سيكون الوضع لو تمكن كل منا من المساهمة في توفير إنذار مبكر للعوامل الكيميائية والبيولوجية، أو أن يقوم بصورة روتينية أكثر بتحسس مدى التلوث في بيئتنا الموقعية؟ بهذا سنمتلك الحد الأعلى من فرصة وقاية أنفسنا من هذه المخاطر.

وشركة سي كوست (Seacoast) في كارلزباد (Carlsbad) قرب سان دييغو هي إحدى الشركات التي تصنع متحسسات دقيقة خفيفة الوزن[1]. وقد صُمِّم النموذج الريادي ليثبت على قمصان جنود جيش الولايات المتحدة. ويتألف متحسس سي كوست من طبقة من اللدائن تقع ضمن موصلين للكهرباء. وتدخل المادة الكيميائية المطلوب تحسسها في هذه الأداة، ويتم امتصاصها في الطبقة الفعالة، وهذا يغير الخواص الكهربائية للأداة، وهو تغير يتم تحسسه كهربائياً بسهولة. وكل من هذه المتحسسات ذو قطر يقل عن المليمتر بكثير.

وتعتمد هذه التقنية على نسق من عشرة متحسسات وليس على متحسس واحد شامل، ويقوم كل متحسس باكتشاف صنف محدد من الكيميائيات. وتغير الغازات المختلفة هذه البوليمرات بنسب مختلفة،

---

(1) Jonathan Knight, «Tomorrow's World,» *Nature*, vol. 426 (11 December 2003), pp. 709-711.

ويتم لكل غاز يطلب تحليله قياس أثره على المتحسسات العشر، ويتم تمييز الغازات بواسطة (طبعة أصابعها)، وتلك هي القوى النسبية، لإيقاظها للمتحسسات المختلفة. ورغم أن هذه الشريحة ليست بتلك الدرجة من الشمولية، بحيث تميّز أي غاز عن غيره، إلا أنها تتيح تحليل أكثر من عشرة غازات بصورة صحيحة.

وقد قام تيم سويجر (Tim Swager) وفريقه في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا[(2)] باستخدام أسلوب آخر للقياس الحساس لسموم عصبية محددة، فهم لا يقومون بقياس التغير في الخواص الكهربائية، بل يبحثون بدلاً من ذلك عن التغيرات في كيفية إنتاج الضوء في البوليمرات الحساسة كيميائياً. وهم يعملون مع بوليمرات تنتج الضوء بكفاءات ذات تباين كبير جداً اعتماداً على التصاق جزيئة نوع محدد من الغاز إلى جزيئاتها المستلَمة المهندَسة خصيصاً لهذه المهمة. وقد عرض سويجر ما دعاه بالتضخيم الجزيئي، وهو أسلوب يعمل على زيادة التغير في حالة المتحسس بوجود سموم الأعصاب التي يجب تحليلها، فعندما يتم ارتباط جسيمة سم واحدة إلى متحسسة سيمنع هذا السم انبعاث الضوء عبر الطول الكامل للسلسلة البوليمرية.

ويمكن بسبب هذا التضخيم الجزيئي استخدام مصادر ومحسسات ودوائر الضوء البسيطة لاستشعار انخفاض كفاءة إنتاج - الضوء. ويعطينا هذا إشارة مبكرة قوية، ويمكن أن تكون رخيصة الثمن، تحذرنا من وجود السميات.

---

(2) Anthony W. Czarnik, «A Sense for Landmines,» *Nature*, vol. 394 (30 July 1998), pp. 417-18, and Shi-Wei Zhang and Timothy M. Swager, «Fluorescent Detection of Chemical Warfare Agents: Functional Group Specific Ratiometric Chemosensors,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125 (2003), pp. 3420-3421.

وقد قام سويجر باكتشاف مادة TNT المتفجرة بحساسية، وذلك له أهميته التي تتراوح بين الأمان في المطارات إلى إزالة الألغام. وتتوفر متحسسات TNT في المطارات الآن لكنها غالية الثمن وغير محمولة. أما الكلاب، فهي تعمل جيداً لكنها سرعان ما تسأم، ويمكن استغلال مواهبها بطريقة أحسن في مجالات أخرى. وقد قدم سويجر في متحسسات مادة TNT من ابتكاره حلاً لمشكلة اعترت الأعمال السابقة، ففي المتحسسات السابقة تكتلت جزيئات البوليمر في كوم مرتبة كعيدان الكبريت في علبتها. وبتلك الطريقة ملأت الحيز بطريقة كفوءة وقللت من انتشار الغاز في المتحسس. وبهذا تناقص التغير في بريق المتحسس بوجود مادة TNT. وقام سويجر بتصميم مواد بوليمرية جديدة من جزيئات غير مبسطة، وهي بذلك لا تتكدس فوق بعضها البعض وتحتفظ بدرجة عالية من البريق عند عدم وجود مادة TNT. أما عند تعرضها لـ TNT فإن المتحسسات أظهرت نقصاناً قوياً في شدة استشعاعها.

وقد بين الباحثون أن جزيئات أخرى شبيهة بنيوياً بـ TNT لم تستثر استجابة في المتحسس، وبهذا كانت أداتهم حسنة التمييز حتى بين TNT والجزيئات الشبيهة. وتمتعت الأداة بدرجة مدهشة من الحساسية، ففي حين وصل أداء الكلاب إلى تمييز بضعة أجزاء في التريليون من التحسس، كانت متحسسات سويجر تميز مئة جزء في الكوادريليون(*). وكانت استجابة المتحسس سريعة وقابلة للانعكاس متيحة إعادة استخدام نفس المتحسس.

(*) التريليون (Trillion): هو مليون مليون، أي واحد أمامه اثنا عشر صفراً. أما الكوادريليون (Quadrillion) فهو أكبر من التريليون بألف مرة، أي أنه واحد أمامه خمسة عشر صفراً، لذا فإن مئة جزء من الكوادريليون تمثل عشر الجزء الواحد من التريليون.

وقام فريق سويجر أيضاً باستخدام أساليبه لتحسس غاز الأعصاب، فالجزيئات التي تشكل غاز الأعصاب تمنع عمل مادة كيميائية في أجسامنا تعتبر ذات تأثير هام جداً في عمل الأعصاب، فالإشارات (أو الشعور) تنتقل عادة خلال الجهاز العصبي بمساعدة مادة إرسال عصبية (Neurotransmitter). ولكي تستعار هذه المادة وتصبح متهيأة لنقل الإحساس التالي يجب أن تتفكك بسرعة لكي نستطيع الاستجابة للمحفز التالي. ويتولى أسرع الأنزيمات فعالية في أجسامنا هذه المهمة، إذ يقوم بتفكيك مادة الإرسال العصبية في فترة أمدها ثمانون جزءاً في المليون من الثانية. وإذا ما تم اعتراض عمل هذا الأنزيم فسنصاب بالشلل. وقام سويجر ومجموعته بصنع متحسسات تستجيب بصورة خاصة للطريقة التي يتدخل بها الغاز في عمل هذه الأنزيمات الحاسمة. ولكي يعلموا فيما إذا كانت هذه الأداة تستجيب لغاز الأعصاب تتبعوا إنتاج الضوء في متحسس TNT هذا. ونجحوا مرة ثانية في اكتشاف العامل المستهدف بحساسية كبيرة.

ومتحسسات الأخطار الآن بفضل التصميم النانوي للجزيئات المستخدمة في صنعها ذات دقة وحساسية عاليتين، كما أنها ملائمة لاستخداماتها وسهلة الحمل. والخطوة التالية ستكمن في تفعيل البدلات الذكية التي تقوم بالأداء كاستجابة، فالألياف الواقية والأنسجة المتكاملة في لباس المعركة الذكي ستقوم أوتوماتيكياً بمعادلة عوامل الهجوم الباكتيرية والكيميائية، مثل غاز الأعصاب، فستستخدم المواد الثقوب النانوية التي تنتقل عند اكتشافها للعوامل البيولوجية أو تقوم بمعادلة السموم الكيميائية. وهذه المواد الذكية تقع ضمن المواضيع التي يتم البحث فيها في معهد الجندي للنانوتكنولوجيا (ISN) في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا الذي يموله جيش الولايات المتحدة.

دمج وترحيل المعلومات الحسية

إن تحسس المخاطر في أحد المواقع بداية عظيمة، لكن ما نحتاجه فعلاً هو دمج المعلومات المتجمعة عبر مسرح المعركة وموقع نفايات كيميائية ومجتمع ما وأمة بكاملها. علينا آنذاك أن ننشئ شبكة من المتحسسات وننقل المعلومات خلفياً إلى نقطة وسيطة لتحليلها وفي النهاية للتصرف.

وقد برزت استراتيجية جديدة مؤخراً، فالـ «موتيو» (Moteo) الذي طورته جامعة كاليفورنيا في بيركلي وشركة إنتل هو حاسوب مقزم محتوى ذاتياً يعتمد على بطارية لتوفير الطاقة ويستخدم ارتباطات لاسلكية لتبادل المعلومات. وتعرف الموتيو أيضاً بـ «التراب الذكي» (Smart Dust)، وسيتم تصميمها لتكون بتلك الدرجة من الصغر والرخص والارتباطية بحيث يمكن نشرها مثل أتربة الجن في حقل أو مطار أو منطقة بيئية حساسة لتشكل شبكة كاملة الارتباط من المتحسسات.

وكانت شبكات الهاتف والحاسوب قد أقيمت بطريقة نظامية تاريخياً مع إعطاء تسمية لكل عضو في الشبكة لكي يتم ضمان اتصالات منتظمة. لكن تخطيط مثل هذه الشبكات استباقياً غير ممكن على أي حالة، وذلك عندما نسعى إلى التلقائية، فستقوم الشبكة بدلاً من ذلك بالتغير عبر الوقت: عندما ننزع بدلتنا الواقية من الكيميائيات والمرتبطة بالشبكة وعندما نلبس قفازاتنا التي تمتلك حاسة لمس خاصة بها أو عندما نربط آلة تصوير إلى شبكتنا الاصطناعية، فنحن نحتاج في مثل هذه المواقف إلى شبكات تنظم ذاتها من دون أي تدخل خارجي. وهذا ما تفعله الموتيوات، فهي تتحسس وجود واحدها الآخر من شبكاتها المشكلة حسب الحاجة. وقد قام

المهندسون بتطوير نظام تشغيل يدعى (Tiny OS) للسماح للبرامج لكي تعمل على الموتيو.

وقد قاموا حتى الآن باستخدام الموتيو لإدارة المزارع ومراقبة الهياكل، لتقييم الضرر الناجم عن الهزات الأرضية وللتحكم في عمليات التصنيع ولإعلام المقاتلين في ميدان المعركة. وستستخدم في المستقبل لمساعدة رجال الإطفاء وعمال الإنقاذ في الاتصال في البيئات الخطيرة.

وقد تقود الموتيو إلى ألعاب تفاعلية نتشارك فيها بتجارب حسية متكاملة بما في ذلك الرؤية والسمع والشم والتذوق واللمس، أي مثل التلاكم عن بعد.

وقد تم عرض نظام المراقبة البيئية بواسطة الموتيو على جزيرة غريت دك (Great Duck) في ولاية ماين (Maine)، فقد قام فريق باستخدام شبكة من المتحسسات اللاسلكية لمراقبة المناخ المايكروي حول الجحور التي يلجأ إليها أحد الطيور النادرة. وقامت المجموعة بمراقبة سكن الطيور من دون أن تثير أي فوضى بينها. وكانت الموتيوات مصنعة من حواسيب مقزمة وبطاريات وذاكرة ومرسل-مستقبل لاسلكي.

وكان هناك متحسسات للحرارة والرطوبة والضغط والضياء مدمجة فيها. وقد استمرت هذه الموتيوات حتى اليوم بقياس هذه الكميات وترحيل ما وجدته، قافزة من موتيو إلى آخر عائدة بها إلى محطة الحاسوب الرئيسي. وتتم تغذية المعلومات في ربط مع تابع أرضي يعطي للباحثين وصولاً على الخط للبيانات عبر الإنترنت حيثما كانوا.

ترشيح الجزيئات الضارة بهدف الوقاية البيئية

إن قياس كمية الملوثات والسموم التي تمثل خطراً على بيئتنا المحلية خطوةٌ أولى ممتازة، لكننا بحاجة إلى منع مثل هذه الملوِّثات في المقام الأول. والزيولايتات هي مواد صلبة مملوءة بثقوب ذات حجم نانوي، وقد كانت مستخدمة لعقود مضت لزيادة كفاءة المعالجات الكيميائية وللتقليل من سميتها. وهناك لدى كل منا بعض الزيولات في «المحوِّل الحفَّاز» (Catalytic Converter) في سياراتنا مثلاً أو في مكيف الهواء.

ويتميز الزيولايت بأن جزءاً كبيراً من المجال الداخلي له فارغ. والثقوب فيه لا تتعدى حجم الجزيئات، أي إن قطرها بحدود واحد نانومتر. وتتيح الزيولايتات التي هي بلورات متألفة من عناصر عادية مكررة للثقوب بأن تكون ذات حجم متماثل. ويمكن تصنيع الزيولايت بتركيبات كيميائية متنوعة مما يتيح تكييفاً إضافياً لوظائفها.

وتقع معظم ذرات الزيولايت على أو قرب السطح، وذلك بسبب البنية الداخلية عديدة الثقوب الشبيهة بالإسفنجية، لذا فهي تستخدم لتسريع أو التحكم في التفاعلات الكيميائية وذلك باستخدام هذه السطوح. وتعمل الزيولايتات أيضاً كغرابيل جزيئية (Molecular Sieves) حيث تسمح ثقوبها الدقيقة لبعض الجزيئات أن تعبر بينما تمنع الجزيئات الأكبر حجماً.

ويعتمد الفصل والتنقية الجزيئية على هذه الخاصية. وأساس عمل المواد الحفازة التي تعتمد على الحجم هو الزيولايت الذي يتقبل الجزيئات المتفاعلة الصغيرة فقط أو الذي يسمح بإطلاق الجزيئات ذات الحجم الصغير من نواتج التفاعل فقط أو الذي يقوم بالتحكم في التفاعل من خلال توكيد كون المنتجات الوسطى عبر

مسار التفاعل نحو الاكتمال محددة الحجم تبعاً لحجم ثقوب الزيولايت. وتوفر الكيمياء التركيبية للزيولايت مستوى دقيقاً من التحكم على سلوكيتها، فتلك الغنية بأوكسيد السيليكون، وهو كتلة البناء الجزيئية للزجاج، تتجنب الماء. ويمكن استخدامها لإزالة المركبات العضوية التي قد تسبب السرطان من الماء وتسمح للماء المنقى بالعبور خلالها.

أما تلك التي فيها كمّ أقل من أوكسيد السيليكون فلها تأثير معاكس، حيث تقوم بإزالة الماء غير المرغوب فيه من المذيبات العضوية المستخدمة بكثرة في الكيمياء والمطلوبة بأعلى درجات النقاء.

وتستخدم المحولات الحفازة الزيولايت للتقليل من الانبعاثات الملوثة من أنبوب العادم في السيارات. وهي تقضي على 97 في المئة من الهيدروكاربونات و96 في المئة من أول أوكسيد الكاربون و90 في المئة أوكسيد النيتروجين التي تنبعث من محرك السيارة، وبذلك تزيل هذه المواد قبل أن تصل إلى الجو. وهذه المحولات أجزاء رئيسية في كل سيارة ترتاد طرق أمريكا الشمالية وهي مطلوبة في 80 في المئة من السيارات المستخدمة في العالم. وتستخدم أنواع من المواد الحفازة ذات الأساس الزيولايتي بصورة واسعة في صناعة تكرير النفط حيث يتم فصل مكونات النفط الخام إلى بنزين ووقود النفاثات ووقود التدفئة وزيوت التزليق والإسفلت. إن برميل النفط الخام يحوي نحو 30 إلى 40 في المئة(*) فقط من البنزين، لكن احتياجنا للبنزين يتجاوز 50 في المئة، لذا فإن الفصل وحده ليس كافياً.

(*) تعتمد كمية البنزين المستخلصة بالفصل الأول لمكونات برميل النفط الخام على كثافة النفط الخام والنسبة في الحقيقة هي بحدود 20 في المئة فقط ولا تصل إلى 30 أو 40 في المئة إلا للأنواع الخفيفة جداً من النفط الخام.

ولتحقيق هذا الطلب يتم اللجوء إلى عملية التكسر (Cracking)، أي تكسير الجزيئات الكبيرة، مثل تلك التي هي أساس وقود التدفئة لتحولها إلى بنزين. وقد كانت أنواع الزيولايت التركيبية مستخدمة في عملية التكسير منذ الستينيات.

وهناك حاجة لتحسين إضافي لنوعية الوقود ـ البنزين ذو درجة الأوكتان العالية، وذلك للسيارات عالية الأداء، فمعظم ما تحصل عليه من النفط الخام حتى بعد التكسير لا يمتلك درجة أوكتانية عالية ليحترق بطريقة سلسة في هذه المحركات. وكان الرصاص في وقت ماضٍ يستخدم لزيادة المستوى الأوكتاني للبنزين، لكن عندما سنت القوانين التي تتطلب كمية أقل من الرصاص في البنزين كان المطلوب ابتداع طرق جديدة لإنتاج الوقود عالي الأوكتان. وتستخدم الزيولايتات الآن لتحويل الجزيئات الكبيرة في النفط الخام إلى وقود عالي الأداء ذي مستوى أعلى من الأوكتان. ويمكن رفع درجة الأوكتان إلى مستوى أعلى باستخدام الزيولايت لفصل المكونات ذات الدرجة الأوكتانية الواطئة.

ويستخدم الزيولايت في تنقية الغاز الطبيعي أيضاً. إذ إن الغاز الطبيعي غير المعالج بعد استخراجه من باطن الأرض يحتوي على الرطوبة والنيتروجين وثاني أوكسيد الكاربون إضافة إلى ملوثات أخرى. وهناك حاجة لإزالة هذه المواد لكي لا تتجمد خطوط الأنابيب أو تصاب بالصدأ. وقد صممت أنواع من الزيولايت لاصطياد ثاني أوكسيد الكاربون وجزيئات الماء مع السماح للميثان وبقية المكونات ذات الفائدة بالمرور خلالها. وتستخدم أنواع من الزيولايت أيضاً لإزالة 99 في المئة من أوكسيد النيتروجين التي تولد الأوزون وتسبب تكون مزيج من الضباب والدخان (Smog) وذلك من المنبعثات الناتجة عن محطات القوة

الكهربائية التي تحرق الغاز الطبيعي أو وقود الديزل(*).

وقد استخدمت الغرابيل الجزيئية لمعالجة النفايات المشعة أيضاً، فقد ساعدت الزيولايت في تنظيف مواقع المخلفات الخطيرة في (ثري مايل آيلاند) ومواقع أخرى. وقد تكون معالجة الوضع البيئي في الحقيقة من بين أهم الاستخدامات للزيولايتات(3)، فقد قام روبرت س. باومان (Robert S. Bowman)، وهو عالم هيدرولوجيا (Hydrologist) في معهد نيومكسيكو للتعدين والتكنولوجيا، بتحوير الزيولايتات لمعالجة مدى واسع من الملوثات والسماح للماء النقي بالمرور.

ويمكن لهذه المواد أن تستخدم في المستقبل لاعتراض الملوثات التي تنتشر خلال المياه الجوفية. وكان جزء من مساهمة باومان يتعلق بإظهار أن الكميات الكبيرة من الزيولايت المطلوبة في هذه الاستخدامات يمكن أن تصنع بحجم الجسيمة الصحيح وبكلفة بسيطة. وقد طورت سارة لارسن (Sarah Larsen) في جامعة أيوا زيولايتات ذات حجم نانوي يمكن لها امتصاص المركبات العضوية المتطايرة (Voc's) ـ مثل الكيميائيات في الأصباغ والعديد من سوائل التنظيف، والتي تسبب السرطان في الحيوانات ـ من الهواء. وقد استخدمت هذه المركبات أيضاً مع إضافة الضوء من الشمس لاقتناص المعادن الثقيلة لتتم إزالتها من البيئة. وقد قام ويلفريد تشن (Wilfred Chen) في جامعة كاليفورنيا في ريفر سايد بصنع مواد على المقياس

---

(3) U. S. EPA 2004 Nanotechnology Science to Achieve Results (STAR) Progress Review Workshop - Nanotechnology and the Environment II, August 18-20, 2004.

انظر: http://es.epa.gov.

النانوي هدفها تقليل تركيز المعادن الثقيلة الخطيرة في الماء. ويقوم تشن بهندسة بروتينات ذات انتقائية عالية لأنواع معينة من المعادن، هادفاً إلى إزالة الانتقائية للكادميوم والزئبق والزرنيخ من البيئة.

التقييم الكمي لسمية الجسيمات النانوية

إن الجسيمات النانوية جيدة في التحسس والوقاية والعلاج البيئي، والسبب الأساسي لذلك كونها ذات فعالية كيميائية عالية. وتثير هذه النقطة سؤالاً حول إمكانية كون الجسيمات النانوية مضرة للبيئة وفيما إذا كانت خطيرة بالنسبة للبشر إذا ما تسربت إلى مجاري المياه وإلى الجو. وتبحث فيكي كولفن[(4)] (Vicky Colvin) من جامعة رايس في هيوستن في سمية المواد النانوية، مركِّزة بصورة خاصة على الجسيمات النانوية.

وقد اكتشفت مؤخراً أن سمية كُرات باكي تعتمد كلياً على الحالة الكيميائية لسطوح الجسيمات النانوية[(5)]. وقارنت كولفن سمية الجسيمات النانوية، التي حوَّرت سطوحها كيميائياً لتصبح قابلة للذوبان في الماء، مع تلك التي لم تحور سطوحها. وليست الجسيمات النانوية غير المحوَّرة قابلة للذوبان في الماء، وتلك هي القاعدة. ويمكن لها بالرغم من ذلك أن تتواجد بمستويات واطئة، أي بحدود أجزاء في المليون. وعندما تتواجد هذه الجسيمات غير

(4) Vicki L. Colvin, «The Potential Environmental Impact of Engineered Nanomaterials,» *Nature Bio-Technology*, vol. 21, no. 10 (October 2003), pp. 1166-1170.

(5) Christie M. Sayes [et al.], «The Differential Cytotoxicity of Water - Soluble Fullerenes,» *Nano Letters*, vol. 4, no. 10 (2004), pp. 1881-1887.

المحورة، فهي تميل إلى التكتل وتبقى عائمة على السطح طالما كانت قليلة العدد.

والسُّمية ـ كما تشير كولفن ـ يمكن أن تكون جيدة أو سيئة اعتماداً على المحيط، فالجسيمات النانوية التي تقتل الخلايا يجب أن يتم التحكم بها لكيلا تتسرب في البيئة وتبقى فعالة لمدة طويلة من الزمن وتتراكم وتدخل في طعام الإنسان عن غير ما قصد. ومن الناحية الأخرى، فإن السمية متى ما تمكنّا من التحكم بها فسيمكن استغلالها، فالباحثون الذين يصممون أنواعاً جديدة من العلاج للسرطان يبحثون عن مواد يمكن أن تقتل الخلايا الخبيثة انتقائياً، كما يبحث آخرون عن طرق أفضل للتحكم في الباكتيريا. وقد وجدت كولفن أنها عندما قامت بتغييرات ذكية لسطوح كُرات باكي استطاعت أن تزيد من سميتها بعامل يبلغ عشرة ملايين. وعندما لم تعالج كولفن سطوح كُرات باكي لتساعدها في قابلية ذوبانها في الماء، فإنها تكتلت سوية وأنتجت الأوكسيجين الذي هاجم جدران الخلايا. أما عندما عالجت السطوح فإن كُرات باكي لم تولد الأوكسيجين الفعال، وبقيت سميتها في حدودها الدنيا.

وقد راقب الباحثون أيضاً في تأثيرات الجسيمات النانوية على الحيوانات الحية. وقد ظهرت أولى الدراسات الموثقة لسمية الأنابيب النانوية الكاربونية أحادية الجدار سنة 2003[(6)]. وقد وجدت مجموعتان من الباحثين بصورة مستقلة أن الأورام الحبيبية، وهي التهابات ذات علاقة عادة برد فعل النظام المناعي، تظهر في الجرذان والفئران عندما تدخل الأنابيب النانوية في رئاتها.

(6) D. B. Warheit [et al.], «Comparative Pulmonary Toxicity Assessment of Single - Wall Carbon Nanotubes in Rats,» *Toxicological Sciences*, vol. 77, no. 1 (2004), pp. 117-125.

وهذا يختلف عما يحدث عندما يتم إدخال جسيمات نانوية مصنوعة من نفس المواد إنما ذات حجم أكبر. والسؤال الذي لم تتوفر له إجابة في هذه الدراسات هو حول ما إذا لم تكن الأنابيب النانوية بل المعدن الذي استخدم لصنعها، سببَ ظهور الأورام الحبيبية. ويستمر النقاش بين الباحثين حول مستويات التعرض، وفيما إذا كانت عملياً ذات علاقة، فهل سيتعرض الشخص في أي وقت لمثل هذه التراكيز للأنابيب النانوية في رئتيه؟

وتلاحظ كولفن أن ميدان بحوث سمية الجسيمات النانوية المستحدث هو ذو أهمية فائقة ويشهد جدلاً محتدماً، فالشكّاكون في التكنولوجيا النانوية ومناصروها يقدم كل منهما ادعاءات كاسحة. وتحاول كولفن أن تبرهن أن تقنيي النانو إذا ما قاموا بالعمل على الفور مع أخصائيي السموم ليوصلوا المعلومات التقنية إلى مرحلة النقاش، فإن المخاطر الحقيقية ستكون محددة بطريقة أفضل، وإن هذه المعلومات ستتيح القيام بدراسة المترتبات البيئية قبل تغلغل التقنية النانوية ومنتجاتها.

هل من الممكن للمواد النانوية امتلاك تأثيرات متميزة لكنها ليست بالضرورة سهلة التوقع على البيئة والصحة مقارنة بالذرات التي تتكون منها؟ العديدون سيقولون: نعم، فعندما نصمم مواد على المقياس النانوي لكي يكون لها خواص متميزة عن مكوناتها الذرية أو هيآتها الحجمية الكبيرة، فإن سميتها ستكون مختلفة أيضاً. من الواجب دراسة تأثيراتها البيئية لأن إمكانية انطلاقها في البيئة واردة، أما تلك التي يمكن أن يلامسها الإنسان فيجب أن تدرس سميتها. وذلك على وجه الدقة ما تم عمله في دراسات كولفن وغيرها الأولية، فالمواد المتشابهة ظاهرياً والمحورة كيميائياً بطرق مختلفة

تنتج عنها بعد استخدامها نتائج مختلفة في الحقيقة بصورة هائلة مما يتطلب تحليلاً مهنجياً.

ويجب أن نطرح سؤالاً ثانياً: هل يجب أن تكون الطرق التي نتعامل بها مع السمية الممكنة للجسيمات النانوية مختلفة عن الطرق التي نتعامل بها مع المواد السامة بصورة عامة؟ إن الإطار التنظيمي الذي أعطانا نتائج جيدة لما يشك في كونه مواد سامة للبيئة أو للإنسان يمكن اعتماده بنجاح للجسيمات النانوية أيضاً. وعلى التقنيين النانويين أن يدركوا أن موادهم المستحدثة تمتلك إمكانية الإيذاء، كما أنها جيدة، وعليهم أن يبدأوا بتدقيق النظر بطريقة منهجية في سمية هذه المواد خلال عملية تطويرها. ويوضح الميدان البيئي بصورة صارخة الفرص والتهديدات الموجودة سوية في أي تكنولوجيا شديدة الفعالية: وما يمكن أن يستخدم للخير يمكن أن يكون له تأثيرات ضارة أيضاً. وعلينا كتقنيين نانويين أن نقحم أنفسنا في نقاشات عامة نشيطة لا تقتصر على كيف يمكننا الحصول على أكبر قدر من المنافع من ابتكاراتنا بل يجب أن تشمل كذلك كيف يمكننا الاحتراس من المترتبات السلبية للمواد الجديدة التي ابتدعناها.

الفصل السادس

المحاكاة

إن الطبيعة مصمِّم مبدِع على المقياس النانوي، فهي تبني صدفةَ الحيوانات البحرية بوضع طبقة فوق طبقة من كاربونات الكالسيوم المتبلورة. إن الزبدة التي تستخدمها للصق عجينة طبقات الصدفة هي الصمغ العضوي.

وفي حين لا يألف هذا الصمغ إلا جزءاً بسيطاً من كتلة الصدفة إلا أن الصمغ مدمجاً مع البنية التوريقية للصدفة تجعل مقاومة صدفة الحيوان البحري للكسر تزيد بثلاثة آلاف مرة عن بلورة كاربونات الكالسيوم ذات السمك المكافئ لها.

وحرير العناكب مثال آخر لتصميم الطبيعة[1]، فالقوة المطلوبة لقطعه تزيد بمائة مرة عن القوة اللازمة لقطع سلك من الصلب بنفس القطر. والجزيئات التي تطن في دواخلنا هي محركات سحرية ضئيلة الحجم ذات أداء مدهش.

إن النظام النانومتري الذي يحرق الوقود المخزون في السكريات

---

(1) Zhengzhong Shao and Fritz Vollrath, «Surprising Strength of Silkon Silk,» *Nature*, vol. 418 (15 August 2002), p. 741.

لتتحقق الحركة داخل خلايانا يمكن أن ينطلق بسرعة 800 نانومتر في الثانية مقابل قوى هائلة. ولو رفعنا قياسه ليقارن بالسيارة، فسيكون هذا المحرك الجزيئي بسرعة سيارة يوفر القوة لها محرك نفاث وستخترق حاجز الصوت بسهولة.

في المحاكاة البيولوجية (Biomimetics) تحاكي العلوم الحياة التي تحاكي الفن، ويتعلم الباحثون من الطبيعة مستعيرين عبقرية أساليبها. وهم يعتمدون على الوحي من موادها المتقنة من المعمارية التي تشكل أساسها ويسبغون على المواد خواص جديدة مدهشة. حتى إن المحاكين البيولوجيين وظفوا جهود العاملين في الطبيعة مجبرين الفيروسات المهندَسة جينياً على إنتاج مواد ذات بنية نانوية حسب اختيارنا لكنها من صنع الطبيعة.

بناء المواد باستخدام الفيروسات

إن سلسلة الاختراقات التي حققتها أنجلا بلشر (Angela Belcher) ـ التي كانت في ما مضى في جامعة كاليفورنيا في سانتا بربارا ثم في جامعة تكساس في هيوستن وهي الآن في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا ـ تلقي الضوء على أسس وطريقة عمل بحوث المحاكاة البيولوجية (Biomimetics). تعلم أولاً أساليب الطبيعة وقم بعد ذلك بحثّها على تصنيع مواد جديدة حسب الطلب منظَّمة من القاعدة صعوداً.

قامت بلشر سنة 1996[2] بدراسة الطريقة التي تبني فيها الطبيعة

(2) A. M. Belcher [et al.], «Control of Crystal Phase Switching and Orientation by Soluble Mollusc-Shell Proteins,» *Nature*, vol. 381 (2 May 1996), pp. 56-58.

صدفةَ الحيوانات البحرية، وهي تلك المادة البنائية القوية المتألفة من طبقات بلورية متناوبة ملصوقة ببعضها، أي إنها مثل خشب رقائقي مصنوع على المقياس النانوي. والطبقات التي تؤلف الصدفة البحرية ليست متماثلة بل متناوبة بين نوعين من البلورات، وكلاهما من كاربونات الكالسيوم لكنها تختلف في كيفية تنظيم صفوفها من الذرات: نفس المحتويات بترتيبات مختلفة، مثل توضيب البرتقال في مربعات مقابل أشكال سداسية. هناك نوعان من البلورات تمتلكان قوة على اتجاهات مختلفة للجهد. وإذا ما بنيت الصدفة من نوع واحد من البلورات فإنها ستنكسر نتيجة ضغط بسيط يسلط على استقامة محورها الضعيف، لكن أشكال متناوبة من البلورات تضفي على الصدفة قوة كافية لحمايتها من الإصابة الموجهة من أي زاوية.

ورغبت بلشر أن تعرف كيف قامت الطبيعة بالبناء تبعاً لهذا الأسلوب المعماري المثير للإعجاب. واكتشفت بلشر خلال منهاج تحرياتها أن الحيوان البحري المدعو الـ «أبالون» (Abalone) يناوب بين استخدام نوعين من البروتينات ليعزز نموّ الطبقات المتعاقبة. ويقوم الحيوان الرخوي البحري بإفراز هذه البروتينات بالتعاقب ليرشد التواتر المكاني في عملية بناء الصدفة. ودرست بلشر طريقة عمل البروتينات ووجدت أن كلاً منها متخصص في تفاعل كيميائي مفرد محدد. ويدير كل منهما نمو نوع خاص من البلورات ويحدد اتجاهها. وهذه البروتينات المدمجة في «دي. أن. آي.» حيوان الأبالون هي بمصافّ مدراء المشاريع التي توجه البناء محولة الرؤية المعمارية للطبيعة إلى صرح شديد القدرة على التحمل. وقامت بلشر بالتعمق في بحثها[3] لتكتشف سبب تمتع هذه الأصداف بقوتها الفائقة.

---

(3) Bettye L. Smith [et al.], «Molecular Mechanistic Orgin of the Toughness =

وركزت بحثها بصورة خاصة على الصمغ الذي يربط طبقات الصدفة. ويتألف هذا الصمغ من جزيئات طويلة هي بوليمرات لزجة في نهايتها تعمل على ربط الطبقات سوية. ولكي تدرس قوة هذه الجزيئات قامت بلشر بالإمساك بواحدة من نهايتي إحدى الجزيئات وسحبتها لتقيس مقاومتها. واستخدمت لهذا الغرض مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscope) ذا مجسس بمقياس نانوي يمكن التحكم بقوة سحبه ويمكن قياس حركاته بدقة. وقامت بلشر بشد اللاصق جزيئة فجزيئة، ووجدت أن البوليمر لا يقاوم الشد بطريقة سلسة لكنه تمدد بطريقة تدريجية. وتبين أن كل جزيئة هي حبل معقود، وانفتحت العقد الإضافية فجأة كلما اشتدت قوة السحب مما يحرر الشد قبل أن ينقطع الحبل ويُفقد الارتباط بطبقات البلورة.

وتوضح من خلال بحوث بلشر كيف أن الأبالون يمتلك الجساءة والقوة في الوقت ذاته ولا يتعرض للتهشم، فالخيوط في المادة الصمغية سترتبط بصورة ملحوظة قبل أن تنقطع وسيتطلب الأمر قدراً كبيراً من الجهد قبل أن تحلّ كافة العقد.

وقامت بلشر بالاستعانة بعقوبة سيسيفوس (Sisyphus Punishment) الأسطورية، فكلما قام سيسيفوس بدفع صخرته إلى أعلى التل تدحرجت إلى الأسفل، وكانت نتيجة جهده لا شيء، وقد تبددت بهيئة حرارة. ويلعب دور سيسيفوس في الربط التلاصقي لطبقات الأبالون من يحاول كسر صدفة الأبالون، وهو القندس البحري (Sea Otter).

ويسلط هذا الحيوان قوة كبيرة لكنه لا يزيد على مط هيكل

---

of Natural Adhesives, Fibres and Composites,» *Nature*, vol. 399 (24 June 1999), = pp. 761-763.

الصدفة قليلاً. وقبل أن تنقطع ألياف الخيط الذي يربط طبقات الصدفة تنفتح عقدة مخففة الإجهاد على الخيط. ويتحول جهد سيسيفوس، أي القندس البحري، إلى حرارة، فهو لا يصل أبداً إلى نقطة انقطاع الخيط بل يصاب بالإحباط عندما يعود الخيط إلى وضعه المتحرر من الإجهاد وتبقى الصدفة سليمة.

ولم تكن الطبيعة قد أنجزت هذا التصميم البارع عن قصد إنما حصلت عليه صُدفةً، فالـ «دي. أن. آي.» (الحمض النووي) يحتوي على تتابع المعلومات الجينية الذي يصف بروتينات التصميم التي تقوم ببناء الصدفة، فالطبيعة قد حاولت من خلال تغيرات حياتية تصادفيه عديدة، وقام التطور باختيار الـ «دي. أن. آي.» الذي أفرز أكثر الصدفات مقاومة للقندس البحري. وكان معظم عمل بلشر الذي تلا ذلك من وحي هذا النسق لأسلوب المحاولة ـ والخطأ. ويتم من خلال العمليات البيولوجية تنفيذ مليارات المحاولات وغربلة النتائج بطريقة مناسبة للبحث عن النجاحات الثمينة، وهذه هي الاستراتيجية التي توفر طريقة فعالة لهندسة المواد الجديدة. ولم تكن بلشر قانعة بالانتظار لملايين السنين من التطور، لذا قامت بمحاكاة أساليب التطور في الطبيعة، أي التغيير ومن ثم اختيار البقاء للأنسب في مختبرها ذات يوم.

البحث عن البروتينات الذهبية

اختارت بلشر هدفاً للعبة التطور التي تلعبها[4]: أن تحض الطبيعة على تشكيل صف من الجسيمات النانوية النقية لأشباه

---

(4) Sandra R. Whaley [et al.], «Selection of Peptides with Semiconductor Binding Specificity for Directed Nano-Crystal Assembly,» *Nature*, vol. 405 (8 June 2000), pp. 665-668.

الموصلات المتبلورة، وعلى جعلها تشير إلى ذات الاتجاه. وتعتمد الخواص الكهربائية لبلورات أشباه الموصلات على كون محاورها البلورية تصطف في ذات الاتجاه، وقد بيَّن عمل بلشر مع الأبالون أن البروتينات تمتلك هذه الإمكانية، فهل ستستطيع توظيف آليات البيولوجيا التي صقلها التطور المتسارع وتستخدمها لإنماء أشباه موصلات محسنة، وهي تلك المادة التي تصنع منها الحواسيب ومشغلات الأقراص المدمجة وأنظمة الاتصالات؟

بدلاً من الانتظار للتغييرات الحياتية[5]، ستقوم بالبحث بطريقة نظامية خلال مليارات الخيارات البروتينية في تجربة واحدة، وقامت بالحصول على مجموعة من سلاسل المادة الجينية التي حوت شفرات عدد هائل من البروتينات. وتستخدم بلشر في لعبة التطور التي تمارسها معاييرها للبحث ليس عن البروتينات التي تضفي إمكانية سبق وحش أفريقي أو إغواء نساء الكهوف الخصيبات، إنما عن البروتينات التي تساعد على بناء بلورات شبه موصلة من النوع والشكل والحجم الذي ترغب به.

وتبدأ البروتينات بالتشكل كسلاسل من الجزيئات مشتقة من أبجدية مؤلفة من عشرين حامضاً أمينياً، وهي قلائد ذات أي طول ممكن لكنها مصنوعة من مجموعة محدودة من الجواهر: اللآلئ والماسات ومكعبات الزركونيوم وما إلى ذلك. وتتابُع أنواع الجواهر على امتداد القلادة مكتوب في الـ «دي. أن. آي.» الذي في أجسامنا، وترجمة الـ «دي. أن. آي.» إلى سلسلة بروتينية هو

(5) Nadrian C. Seeman and Angela M. Becher, «Emulating Biology: Building Nanostructures from the Bottom up,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, suppl. 2 (30 April 2002), pp. 6451-6455.

خريطة واقعية، فثلاث جزيئات على الـ «دي. أن. آي.» ستمدد أي جوهرة تأتي بعد سابقتها على القلادة. إن المدى السلوكي للبروتينات مذهل، لأنها لا تبقى كسلاسل طويلة بل تلتف على نفسها بدل ذلك ملتوية في أشكال وبنيات تعتمد على توالي الجزيئات المتألفة منها. والتواءات البروتينات تشبه الأوريغامي(*) (Origami) على المقياس النانومتري، والطبيعة هي من يقوم بعملية الطي. والنتائج التي تنجم مختلفة، فهناك الشريطي وعلى شكل المنديل، أو رباعية السطوح أو الكروية. ويجعل شكل البروتين وكيمياؤه، أكان غير منتظم أو معقداً أو عاليَ التطور وظيفياً، ذلك البروتين ملائماً مثل مفتاح لقفل معين، فالبروتينات تفتح الأبواب لفعاليات معينة داخل الخلية.

وحصلت بلشر على مكتبة متكاملة من الفيروسات[6] كان الـ «دي. أن. آي.» فيها متشابهاً، عدا استثناء واحد إذا كان هناك واحد من ملياري توالٍ ممكن مبرمج في جينات هذه المجموعة من الفيروسات. وكانت هذه التواليات موجودة في الشفرة الجينية لكل فيروس، بحيث تبرمج إنتاج بروتينات يتم عرضها على الغلاف الخارجي للفيروس. وكان كل ما يمكن بواسطته تمييز فيروس عن آخر في ذلك الحشد الهائل من الفيروسات هو المجموعة المتميزة من شرائط البروتين المنتشرة خلف الفيروس.

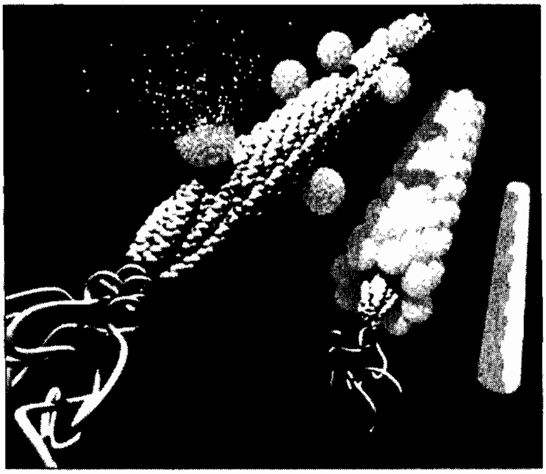
وقامت بلشر بإطلاق هذا الحشد حراً على بلورة من مادة شبه موصلة. ثم قامت بشطف تلك التي لم تلتصق، مبقية فقط على الفيروسات التي التصقت إلى المادة شبه الموصلة بفضل بروتيناتها،

(*) الأوريغامي: فن طيّ الورق الياباني.

(6) Seung-Wuk Lee [et al.], «Ordering of Quantum Dots Using Genetically Engineered Viruses,» *Science*, vol. 296 (3 May 2002), pp. 892-895.

وهذا هو البقاء لأكثرها تمسكاً. وكانت تلك التي التصقت قد احتفظ بها مهيئة للجولة التالية.

وتقدمت بلشر التي كانت سلكت المسار من دراسة الطبيعة إلى محاكاتها لتقوم الآن باستغلال تعاون الطبيعة لابتداع مواد جديدة. قامت **أولاً** باستحصال مجموعة كبيرة ومنقاة من الأجناس الفرعية للفيروسات التي وجدتها ملتصقة إلى بلورة المادة شبه الموصلة موضوعة بحثها. ولم تعد هناك حاجة لتجربة مفاتيح أخرى: فقد التقطت المفتاح المناسب وحملت ملايين النسخ منه. ولكي تصنع النسخ وظفت لذلك الغرض «مصنع الفيروسات»، وهو باكتيريا إ. كولي (E. Coli) المصابة بالفيروس ذاته. وتم الاستنساخ حسب الطلب للفيروسات التي نجحت في الجولة السابقة. وبدل أن تقوم بملاحظة التصاق فيروسها بشبه الموصل قامت بلشر بإنماء شبه الموصل ذلك على خلاف الفيروس المختار لذلك الغرض.



فيروس مكسو ببلورات نانوية وقد اتخذت استقامتها من خلال اتجاه الغلاف البروتيني للفيروس (بموافقة من مجلة *Science*)

وعززت البروتينات على الغلاف الخارجي للفيروس نمو الجسيمات النانوية التي أرادتها بلشر. ولم تكن البروتينات مرتبة بطريقة اعتيادية على الفيروس، إنما اصطفت حسب نسق موحد على استقامة شكل الفيروس القضيبي، حتى أنها رتبت نفسها في صفوف طولية وحلقات محيطية على طول الأسطوانة بشكل سترة بروتينية شبيهة بقماش الكوردوري. واصطفت الجسيمات النانوية التي أنمتها بلشر كذلك على الفيروسات في مدرجات ضمن مجموعات مرتبة من البروتينات. وحاكت إنجازاتها، كما كان قصدها، طريقة النمو الطبيعية لصدفة الأبالون، إذ إن اختيار البروتينات سهل النمو للبلورة وحدد اتجاه ذراتها.

إن هذه التقنية التي استخدمتها بلشر في نهاية التسعينيات(7) للبحث عن بروتينات ذات خواص خاصة، تمّ وضعها قيد الاستخدام لأكثر من عقد لتطوير أدوية جديدة. إن وجود بروتين على خلية تنم عن مرض كالسرطان يتيح للباحثين مفاتيح بروتينية تناسب القفل، يمكن بعد ذلك استخدامها في العلاج الكيميائي على أساس «ابحثْ ودمّرْ». إن الأدوية المفرّدة (أي لاستخدام الفرد) في حالتها القصوى يمكنها تجنيد مليارات الفيروسات لتطوير عقار فُصِّل على قياس حالتك الفريدة من نوعها: أي طلب العقاقير مقدماً.

وليست كل التطبيقات الممكن تصورها جيدة من دون لبس. هل يمكن للباحثين اقتناص جزيئة يمكنها الحلول محل الأوكسيجين الموفر للحياة بدرجة أقوى من الغازات المستخدمة الآن في الحروب الكيميائية والمرتبط بسايتوكروم(*) A (Cytochrome A3). وإذا ما

---

(7) Mehmet Sarikaya, «Molecular Biomimetics: Nanotechnology through Biology,» *Nature Materials*, vol. 2 (September 2003), pp. 577-585.

(*) السايتوكروم (Cytochrome): عامةً هو بروتين يوجد في الدم وفيه عادة مجموعة (Heme) ويقوم بعملية نقل الإلكترونات. وتحيط مجموعة (Heme) عادة بنواة معدنية من عنصر الحديد. ووظيفة (سايتوكروم (A)) هي نقل الأوكسيجين خلال دم الكائن الحي.

أطلقت هذه الجزيئة في الجو فسيمكنها إصابة مدينة كاملة بالاختناق. أو هل يمكننا تسريع التطور؟ إن الهيموغلوبين ناقل ممتاز للأوكسيجين، إذ يحمّله بسرعة، ويحمل كميات كبيرة منه في حيز صغير ويطلقه حسب الطلب. لكن ربما يمكننا أن نحسِّن على ذلك، أي أن نرعى نوعاً متميزاً من البروتين ـ لنسمِّه شيموغلوبين ـ يتميز بأنه أخف وأقل حجماً ويقوم بتحميل ونقل وإطلاق الأوكسيجين بطريقة أكفأ، فهل سنستخدمه لاستيلاد أمة من أمثال لانس أرمسترونغ(*) (Lance Armstrong)؟

وإذا ما نجحنا في محاكاة الطريقة التي تبني البيولوجيا بها المادة والحياة فستمتد الإمكانيات بعيداً وراء تصوراتنا الحالية، فبدلاً من الاقتصار على زارعة اللؤلؤ فقط لماذا لا نقوم ببذار ورعاية وحصد تشكيلة متنوعة من المواد البنائية؟ وسنتمكن من خلال استخدام تحويرات جينية مختارة من إنماء الدرع الخارجي لسيارة فائقة القوة مستلهمين طريقة حيوان الأبالون، أو قد نقوم بحقن نوع بدائي من الصمغ بشكل بروتين يبن الغلاف الداخلي لإطار السيارة والرقعة ونصدر الأمر «يا أيها الإطار أصلح نفسك».

وبدلاً من تصنيع عدد مولدة الكهرباء من الضوء من نبات السبانخ لماذا لا نقوم بزراعة وسقي وتنمية مثل هذه العدد وتركها لترتبط مباشرة بشبكة نقل الكهرباء.

توفير القوة للحياة من خلال المحركات الجزيئية

إن عالم البيولوجيا، كما في أعمال أنجلا بلشر، قد أسبغت

(*) لانس أرمسترونغ (Lance Armstrong): أمريكي من مواليد 1971، رياضي فاز في العديد من سباقات الدراجات. أصيب بالسرطان ثم عاود مشاركته بسباق (تور دو فرانس) ليربحه خلال سبع سنين متتالية (1999 لغاية 2005) مما جعله بطلاً رياضياً أسطورياً.

عليه البنى الرائعة جمالاً أخاذاً. لكن البنى الطبيعية حية كذلك، فالحياة تعني الحركة. وقد استخدمت المحاكيات البيولوجية التي إبتدعتها أنجلا بلشر حتى الآن لبناء صروح ساكنة فقط. لكن التقنيين النانويين يلتمسون الآن تحريك الجزيئات وتحويل وضعها الساكن إلى رقصة.

ولدى الطبيعة الكثير مما يمكننا تعلمه في هذا الخصوص. إن الحركات الرشيقة لراقصة البالرينا (راقصة الباليه) تبرز في الأصل من فعل الجزيئات المفردة، فجزيئات السكر في دمنا تختزن الطاقة وتوفر الوقود. وهذه ترسو على محرك بحجم جزيئة وتحول شكله على حساب الطاقة المخزونة في السكر. وتقوم العتلات بتضخيم الدوران البسيط إلى دوران رئيسي: ضربة رشيقة للذراع الجزيئي. وهذه المحركات مرتبطة بسكك مصنوعة من جزيئات بروتينية طويلة ويحوّل التضخيم الحركة البسيطة إلى قفزة باليه عالية عبر المسار الجزيئي. وتكون المحركات في تقلص العضلات مشدودة إلى الأسفل ومثبتة على السكة وتتحرك بصورة نسبية إلى السكة الثانية، وهي بذلك تدفع السكتين للانزلاق واحدة بالنسبة للثانية. إن البنى التي تشكل العضلة يمكن أن تغير طولها بنسبة 10 في المئة خلال واحد من خمسين جزء من الثانية ـ ويعتمد الركض والإقلاع وعزف البيانو كله على هذا.

والحركة على المقياس النانوي تشبه إلى حد بعيد القوى المدهشة التي تولدها لدى الفنانين والرياضيين، في أنها تشبه الأداء الذي يبعث بالمرء في نوم مغناطيسي، مثل مسرح **سيرك الشمس**(*) (*Cirque du Soleil*). والشخصيات المشاركة في الأداء هي مجموعة

(*) مسرح سيرك الشمس (Cirque du soleil): مسرح تمزج فيه الحيَل الإلكترونية مع أداء لاعبي السيرك بحيث تَصَوَّرَه المؤلف مصدراً لتنويم المشاهد مغناطيسياً.

من البهلوانيين المتناسقين المرني الأجسام ورشيقي الحركة. والكينيزين (Kinesin) هو محرك جزيئي ينظم المادة في الخلايا وله ركيزتين تفوقانه طولاً باثنين وسبعين مرة، ويخطو خطوات تفوق طوله بخمسة عشر ضعفاً. أما الميوزين (Myosin)، الذي يوفر القوة لتقلص العضلات، فهو سيدة ذات رأسين تسير رأساً ـ فوق ـ رأس عبر جسر معلق. ويتباهى لاعبو القوى الجزيئيون هولاء بإمكانياتهم المذهلة من دون خجل: فلو كانت جزيئات الكينزين تُملأ لحملت كل منها حبة بطاطا عبر السجادة التي افترشت في السفرة.

والمحركات الجزيئية شديدة الأهمية لكل ارتعاشة داخل الخلية وفيما بين الخلايا. وليس من المدهش أيضاً، مع معرفتنا بأهمية دور المحركات الجزيئية في الحياة، من مستوى الأميبا مروراً بالضفدع الصغير وحتى الإنسان، أنّ تعطُّل هذه المحركات له مترتبات خطيرة، فالعديد من الأمراض ترتبط بنوع من أنواع الخلل في عمل واحد من المحركات، وهذا عادة نتيجة لتشوه بنيوي ـ حتى في أنواعه ـ في نوع من البروتينات. ويمكن على الغالب أن تعزى اختلالات تصيب لون البشرة أو فقدان السمع أو البصر أو أمراض الكلى أو أمراض الانحلال العصبي، إلى علل في هذه المحركات. ويمكن أن يكون القصور في عمل المحركات في بعض الأحيان مميتاً: والفيروسات تنجح من خلال توظيف المكائن الجزيئية لأهداف تخدمها.

وهناك عدد من أنواع السكك التي تتحرك عليها المحركات الجزيئية. ومثلما كانت ملائمةُ عجلاتِ القطار للمسافة بين السكتين أساسيةً لعمله، كذلك بنية المحرك الجزيئي، يجب أن تلائم خواص سكته، فبعض السكك لولبية تلتف مرة في كل ستة وثلاثين نانومتر. أما الأخرى فهي أنبوبية مثل المنزلقات في الحدائق المائية. وتزحف

المحركات الجزيئية على طول السطح الخارجي للأنبوب المقوّى كأسطوانة ممتلئة من هيكل دراجة هوائية.

والمحركات الجزيئية هي محولات للطاقة الكيميائية المختزنة في السكر إلى فعل ميكانيكي. إن ارتباط الوقود إلى المحرك الجزيئي يغير شكل الجزيئة، إذ يفتح فراغ عرضه نصف نانومتر ويعاد ترتيب موقع ارتباط السكر.

ورغم أن الحركة متواضعة إلا أنها تتضمن مستوى واحداً من المسبب والأثر، وهو حركة تؤدي إلى إعادة الترتيب، فإذا ما مرت امرأة فائقة الجمال على شاطئ البحر فإن الوضع الأمثل لمايوه السباحة الذي يرتديه الرجل الذي يراها سيتغير نتيجة التغير التكيفي لوضع جسمه، وذلك يحتاج إلى إعادة ترتيب. المهم هو أن عملية إعادة الترتيب تحدث الآن داخلياً (جزيئات البروتين ولباس السباحة) وليس في السكر فقط (السكر، المرأة فائقة الجمال)، فالحركة تنتقل إلى حيث الحاجة لها.

ولما كانت إعادة الترتيب على المستوى دون النانومتري ستقود إلى تقدم بطيء عبر سكة يبتعد عنصراها عن بعضهما 36 نانومتراً لذا يجب أن تستخدم القوة. وترتبط إحدى ذراعي عتلة إلى نهاية جزيئة محرك.

وتتأرجح عتلة صلبة في أحد المحركات، وهو الميوسين، خلال زاوية قد تصل إلى 70 درجة، وهي حركة تعرف بضربة العمل. أما المحركات ذات أذرع العتلات الأطول فتخطو خطوات أكبر وتحدث فعلاً أقوى، ونتيجة كل ذلك درجة هائلة من التضخيم، إذ ينتج عن الدوران البارع لمفصلي الورك للماشي على الركائز خطوة عملاقة.

لكن المطلوب يفوق ذلك، لأن الخطوة الواسعة ليست تجولاً، فالمحركات الجزيئية إما تلتصق بسكتها وتمشي مئات الخطوات، أو تقفز عن السكة بعد خطوة واسعة أو اثنتين. وكلا الصنفين مهمين جداً بالنسبة للحياة، فتلك التي تسير العديد من الخطوات على سككها هي على سبيل المثال ناقلة المواد داخل الخلية. وهذه المحركات هي من ذوات الرأسين، وتؤمن أنها حتى في منتصف خطوتها لديها رأس ملتصق بصورة محكمة إلى السكة وأن المحرك سيندفع إلى الإمام حتى إذا ما كانت هناك قوة تسحبه إلى الخلف.

وقد قام العلماء مؤخراً بالنظر في الطريقة التي تتحرك بها هذه المحركات، وكانت هناك إمكانيتان أعطيتا اهتماماً جدياً. هل تهادت المحركات في مسيرتها؟ أو هل تسلقت؟ وإذا ما قامت بالتسلق فهل كان ذلك كدودة تزحف إلى الأعلى؟ أو أنها تسلقت بسرعة يداً بعد يد؟ وقد قام يال غولدمان[(8)] (Yale Goldman) وزملاؤه في جامعة بنسلفانيا مؤخراً بالبحث عن إجابة من خلال مراقبة كيفية سير المحرك على السكة. وأنجزوا ذلك بواسطة ربط جزيئة وَمْضِيَّة إلى ساقه، فإذا زحف مثل الدودة فإن الرأس سيتحرك خطوة مساوية لحركة الحمل الذي يحمله. أما إذا تسلقت يداً بعد يد، فإن الرأس يتحرك أكثر من الحمل في كل خطوة. ولما كان جيف جيلز[(9)] (Jef Gelles) في جامعة برانديز في ماساشوسيتس قد ألغي في زمن سابق فرضية التهادي، فإن غولدمان استنتج في سنة 2003 أن مجموعته من

(8) Ahmet Yildiz [et al.], «Myosin V Walks Hand - Over - Hand: Single Fluorophore Imaging with 1.5 - nm Localization,» *Science*, vol. 300 (27 June 2003), pp. 2061-2065.

(9) Wei Hua, Johnson Chung and Jeff Gelles, «Distinguishing Inchworm and Hand - Over- Hand Processive Kinesin Movement by Neck Rotation Measurements,» *Science*, vol. 295 (1 February 2002), pp. 844-848.

المحركات كانت تتحرك يداً بعد يد. وأعطى غولدمان في خطابه للاجتماع المتكامل في اللقاء السنوي للجمعية البيوفيزيائية أفضل محاكاة لحركة الميوسين V (Myosin V's) على ألحان أغنية جيمس براون **لدى أبي حقيبة جديدة تماماً** (Papa's Got a Brand New Bag).

ويقوم محرك جزيئي آخر باستحثات الأهداب، وهي شعيرات دقيقة تبرز من سطح الخلايا لتتمايل. وهذه الأهداب ذات القطر البالغ مئات النانومترات والطول البالغ عشرات المايكرومترات تكنس الغبار والمادة البلغمية من الرئتين. وهي التي تدفع البويضات من قنوات المبيض، أما أقاربها من السياط فتقوم بتسيير الحيامن (Sperm).

وتنحني الأهداب في موجات اتجاهية، وكل حركة مثل قرقعة السوط، فهي تنقذف بضربة شديدة إلى الأمام وتقوم في الطور التالي لتعود إلى وضعها الطبيعي بالانبساط بصورة تدريجية هادئة. والنتيجة النهائية هي دفع إلى الأمام. ويحصل انقذاف الأهداب والسياط بواسطة انحناء قلب أنابيبها المايكروية باستخدام المحركات البروتينية. وهذه الأنابيب المايكروية لها بنية تحول الانزلاق إلى التواء، وتأتي الطاقة مرة أخرى من السكر.

إن الاختبار الصحيح حول فهمنا لكيفية عمل المحركات الجزيئية سيكوّن إمكانياتنا على تصميمها لتناسب احتياجاتنا. إن عبقرية آليات الطبيعة تضع مستوى عالياً، لكن المردود سيكون عظيماً بدرجة تستحق التحدي.

اختراع محركات جزيئية جديدة

حقق روس كيلي[10] (Ross Kelly) من كلية بوسطن مؤخراً

---

(10) T. Ross Kelly, Harshani De silva and Richard A. Silva, «Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System,» *Nature*, vol. 401 (9 September 1999), pp. 150-152.

تقدماً نحو المحركات الجزيئية من تصميم البشر. والمغزى أن المحركات من النوع الذي ابتدعه كيلي يمكن تشكيلها من بضع دوزينات من الذرات، ويمكن صنع مليار مليار ماكنة في دفعة واحدة. ويقوم عمله، على ما تمّ إظهاره سابقاً، عن سقاطة جزيئية ودولاب يكبح بواسطة كابح مقوس ويفضل الدوران في اتجاه واحد. وهكذا يكون للجزيئة تفضيل اتجاهي، مثل سقاطة جزيئية، ومن دون ذلك سيكون للمحرك قابلية متساوية للدوران في الاتجاهين، ولن يعطي حركة صافية إلى الأمام. وقد تمكن كيلي من الحصول على حركة صافية مقدارها 120 في محركة الجزيئي لكنه لم ينجح في الحصول على حركة دورانية مستمرة.

أما ل. إ. ج. بروير (L. E. J. Brouwer) من جامعة أمستردام، فقد ابتدع محركاً جزيئياً يعمل مثل مكبس. والذي يوفر له الطاقة ليس وقوداً كيميائياً بل الضوء المباشر، فضربة القوة التي يحدثها الضوء تحول الطاقة الضوئية إلى قوة ميكانيكية. لذا فبإمكاننا أن نحلم بعضلات تستمد القوة مباشرة من الشمس متجنبة التحويل والخزن الكيميائي الوسيط.

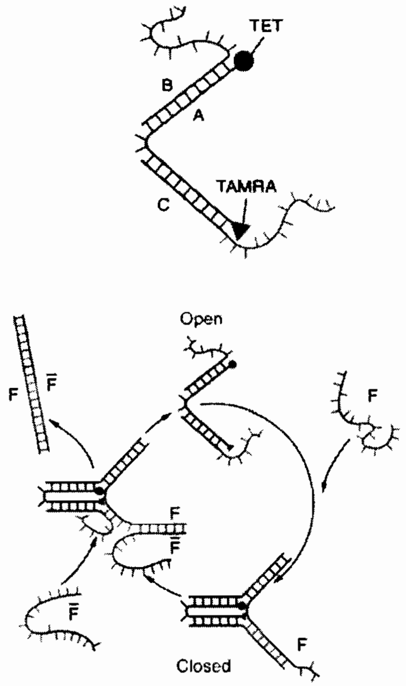
وقد قام الباحثون مؤخراً، إضافة إلى السقاطات والملاقط، بتصميم ملاقط جزيئية، فقد بين برنارد يورك[11] (Bernard Yurke) في مختبرات بلْ في نيوجرسي والمتعاونون معه في جامعة أوكسفورد إن مكائنهم نفذت عمليات مستمرة ـ حركة مكررة، فقد استخدم الباحثون الـ «دي. أن. آي.» واستفادوا من خاصية تعرف بـ «التهجين» (Hybridization)، فجزيئة الـ «دي. أن. آي.» ستلتصق

---

(11) Bernard Yurke [et al.], «A DNA -Fuelled Molecular Machine Made of DNA,» *Nature*, vol. 406 (10 August 2000), pp. 605-608.

سوية مشكِّلة لولباً مزدوجاً إذا ما كان خيطاها المَجْدُولان يشكلان زوجاً تكاملياً، أي إذا كان المفتاح يناسب القفل.

وقام يورك بصنع ماكنته من مزج ثلاثة أنواع مختلفة من الـ «دي. أن. آي.» بنسب متساوية، وسندعو أنواع الـ «دي. أن. آي.» أ، ب، ج. وكانت جديلة أ متكاملة مع الجديلة الأقصر ب في إحدى نهايتيها ومتكاملة مع الجديلة ج في النهاية الأخرى. وهكذا يكون مجموع طولي ب و ج مساوياً لـ أ تقريباً. والـ «دي. أن. آي.» المهجَّن ذو الجديلتين جاسئ، وهكذا يكون ذراعا الملقط صلبين. أما المفصل فقابل للانحناء. ويظل الملقط مفتوحاً على المسرح.



الملاقط الجزيئية ليورك (Yurke) التي تفتح وتغلق من خلال إضافة الدي.إن.أي.
بموافقة من مجلة *Nature*)

وأدى إدخال جديلة الوقود ف إلى إقفال الملقط. وتمتلك الجديلة ف جزءاً يماثل النهايات المتدلية من جديلتي ب و ج، مما يجبر ذراعي الملقط على الالتحام. وكانت ملاقط يورك قابلة للعمل العكسي، لأن إدخال الجديلة فَ التي تتلائم بصورة تامة مع الجديلة ف يسرق هذه الأخيرة من تهجينها مع ب و ج. إنها تتدخل في الرقصة الجزيئية لتخطف ف تاركة الملقط لينفتح. إن ناتج التفاعل ـ أي الوقود المستنفذ ـ هو ف وفَ وجزيئة «دي. أن. آي.» مهجنة اختلقت بعد إكمال دودة الملقط.

ونجح يورك ومساعدة في بناء محرك جزيئي من خلال أبسط الأفعال، أي من خلال سكب كؤوس مختبرية من الجزيئات الواحد في الآخر. وقد أدى التصميم الجزيئي الرائع سوية مع عمل بسيط إلى براعة نانومترية من بنات فكر يورك ومن عمل الطبيعة شديد الدقة.

محاكاة الحياة

توفر الحياة نموذجاً موحياً من التعقيد والتحكم البارع. ونحن لم نتعدَّ مرحلة خدش سطح ما يمكن إحرازه من تصنيع الجزيئات الذي توحي به البيولوجيا.

وقد تمت الاستعانة بحركة ملاقط يورك اختيارنا باستخدام آلية القفل والمفتاح للمزاوجة التكاملية للدنا. وقد أحرز التقنيون النانويون الآن تحكماً على الجزيئات لا يقتصر على استخدام حركة الذرات «من القمة إلى الأسفل» كما في المجهر الثاقب الماسح، لكن استناداً إلى التصميم الجزيئي أيضاً الذي تقوم بالعمل فيه قوى طبيعية مفهومة جيداً. إن نوع التحكم الذي يمارسه الباحثون على الحركة الجزيئية يفتح فرصاً جديدة لتصميم وتركيب بنى نانومترية.

ويمكن تخيل نسق متكامل من المكائن لكل منها سلوكية محددة التوالي خاصة بها وتعمل من خلال سلسلة من أنواع وقود القفل والمفتاح.

ويمكن لتفاعلات جديدة أن تشابه دورات العمل داخل أجسامنا تقوم باختزان واستهلاك الطاقة. وإذا ما تم تكبير مقاسها فستحاكي طبقات وطبقات من التطور داخلنا، من الجزيئية إلى الخلوية وإلى عالم الإحساس.

المعلومات



دعنا ننظر إلى المدى الذي قطعناه في عهد المعلومات، وكيف أننا لم نقم سوى بخدش سطح الإمكانية، فأول حاسوب كان فيه برنامج مختزن، وهو حاسوب ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer)، بني سنة 1946، وكان يعتمد على الصمامات الفراغية ويمكنه جمع خمسة آلاف رقم في ثانية واحدة أو أن يحتسب مسار قذيفة مدفعية في ثلاثين ثانية.

وبلغ وزن ENIAC ستين ألف باوند، وشغل حيزاً يبلغ ستة عشر ألف قدم مكعب.

لكنه أيضاً استهلك من الطاقة في احتساب مسار القذيفة أكثر من الطاقة اللازمة لإطلاق قذيفة واحدة.

ولم تكن النجاحات التي تحققت اليوم في تصغير حجم الحاسوب وجعله محمولاً خافية على ذوي البصيرة آنذاك، فقد توقعت مجموعة من الخبراء سنة 1949 أن حاسوباً يماثل ENIAC في قابلياته سوف لا يتجاوز وزن السيارة ولا يحتاج إلى قوة تفوق السيارة... يوماً ما. والحقيقة أن الهواتف الخلوية اليوم تتمتع بقوة حاسوبية تفوق ENIAC بآلاف المرات، وتستهلك من الطاقة أقل مما

يستهلكه واحد فقط من صماماته البالغ عددها 18000 صمام.

وتاريخ تكنولوجيا الاتصالات لا يقل روعة.

قابلو الألياف الضوئية الواحد يحمل مئة ألف مكالمة هاتفية عبر سلك زجاجي ذي قطر أقل من قطر شعرة آدمية. وكان سلك نحاسي ذو كتلة تفوق ذلك أضعافاً مضاعفة ينقل مكالمة واحدة فقط قبل مئة سنة. والنتيجة هي أننا متصلون باستمرار، فالأصوات التي تصدر عنا، وأشكالنا الظاهرة والكلمات التي تطبعها يمكن أن ترسل حول العالم كما لو أن كل منا كان في كل موضع في الوقت نفسه.

على الرغم من ذلك، هناك الكثير الكثير الذي يمكن إنجازه. ماذا ستكون قصص اللامعقول التي سنرويها سنة 2050؟ «هل كنتم فعلاً يا جدي متعودين على وضع أشياء مشعة كبيرة قرب أدمغتكم لتتكلموا مع أصدقائكم غير المرئيين؟»، و«هل كنت يا جدتي فعلاً تستخدمين إبهامك لكبس مئة حرف لرسالة مستعجلة على لوحة مفاتيح بقياس ثلاثة في أربعة؟»، و«هل تريد مني أن أصدق قصصك عن شبابيك صلدة قابلة للطي تحمل صوراً لا تعوزها الدقة للكتب؟».

يقوم التقنيون النانويون ببناء المادة من مستوى الجزيئة صعوداً للتشارك ولاستخدام المعلومات بطرق جديدة. وقد مثلت الحواسيب المبنية على ترانزستورات السيليكون انتصاراً، لكن هذه الاستراتيجية ستفقد زخمها في النهاية، سواء كانت هذه النهاية ستأتي بسبب التكنولوجيا أو الكلفة. ويسعى التقنيون النانويون بدل ذلك إلى صنع المكائن المفكرة من الجزيئات، التي وإن كانت منقوصة التنظيم إلا أنها مبرمجة لتعمل على أي حال. ونحن نسعى أيضاً لوصل البشر مع المكائن والبشر من خلال المكائن وليس من خلال لوحات مفاتيح غير ملائمة إنما من خلال أوجه التقاء مرنة وقابلة لأن يلبسها الإنسان

وتناسب بيئته. ونحن نطور الإنترنت من خليط مزعج من تداولات المعلومات ـ فوتونات وإلكترونات، يتم تبادلها بأساليب غير متقنة وبكلف عالية ـ إلى شبكة متصلة من غير درز، تستمد قوتها من الضوء.

الفصل السابع

الاحتساب

إن الرقاقة الإلكترونية ـ وهي قلب وعقل الحاسوب ـ تصنع من خلال الإنتاج الكثيف وربط ملايين من كتل بناء متشابهة بالغة الصغر تعرف بالترانزستورات. وهذه العدد تنفّذ أبسط المهمات لأصغر وحدات المعلومات: الجمع والطرح وإبطال مفعول البتّات (Bits). وتصبح هذه العناصر عند جمعها قوية ومرنة بدرجة بحيث يمكن إجراء حسابات سريعة وأشكالٍ بيانية ثرية المحتوى وشبيهة بالحياة وألعاب تفاعلية، كل هذا يصبح ممكناً. إن الاستراتيجية البسيطة لكتل البناء هذه، المرتبطة بكثافة تبتدع ماكنة مدهشة، متعددةُ البراعات.

والمادة الأساس لهذه الرقاقات، أي السيليكون، هي مادة مبتذلة تسود في تركيبة الرمل والصخور والشبابيك. وتتألف البلورات النقية المثالية من أنساق مرتبة من الذرات. ويتم نحت الترانزستورات من هذه الكتل البلورية من السيليكون، ويمكن عند ذلك تمرير التيار الكهربائي في هذه العدد أو منعه من المرور خلال مجرى. وهي تعمل بطريقة شديدة الشبه بالأقفال التي تتحكم بمرور الماء في قناة. وتقوم الترانزستورات بدل رفع وإنزال حواجز مادية برفع أو إنقاص حاجز للطاقة يتحكم بمرور الإلكترونات عبر المجرى. وتتشارك

مهمات الترانزستورات للتدفق والتحكم في عُملةٍ واحدة: الإلكترون. ونتيجة لذلك هناك إمكانية الربط التسلسلي (Cascaded Interconnection)، فيقوم التدفق عبر واحدة من القنوات بالتحكم في التدفق في قناة أخرى. وهذا يتضمن إمكانية وجود فوضى، وبدل ذلك إذا ما كانت الماكنة تعمل تحت خطة شمولية ملهمة إمكانية التعقيد الحاسوبي، أي ماكنة ذكية.

ويجب أن يعمل كل ترانزستور بدقة وبسرعة وبكفاءة. وتكمن الدقة في حدة البتّة (Bit) أو العدد الثنائي الذي تمثله، وهو وصف من رقمَيْ 0 و1 صِرْفين لا يتقبل الإبهام. أما السرعة فهو الزمن الذي يمكن أن يتحول فيه الترانزستور من حال إلى أخرى، وهو في يومنا هذا أجزاء من مليار جزء من الثانية. وتأتي الكفاءة من إنقاص عدد الإلكترونات المطلوبة لرفع أو خفض أحد الأقفال، وهو مماثل لتقليل كمية الغذاء التي يستهلكها صانع الأقفال ليمتلك الطاقة للقيام بكل عملية.

طبع الترانزستورات على الرقاقة

يُعْرَف بناء مجموعة مترابطة من هذه الترانزستورات على منصة واحدة بعملية التكامل، وما نحصل عليه سيكون دائرة متكاملة (Integrated Circuit)، وهي رقاقة حاسوب كاملة التكوين. وهذه المجموعة ذات كثافة سكنية عالية لكنها من دون تنويع: هناك ساكن واحد، هو الترانزستور المستنسَخ ملايين المرات. ويمكن للترانزستورات المكررة بطريقة لا هوادة فيها، ولربط ما بينها بطريقة ذكية أن تؤدي سلسلة من المهام المعقدة التي لا يمكن للواحد منها أداءها لوحده. إن عملية الاستنساخ حاسمة في نجاح هذه الاستراتيجية.

أظهر غوردون مور[1] (Gordon Moore) مؤسس شركة إنتل صانعة الرقاقات بصيرة ثاقبة أسطورية في مقالته المنشورة سنة 1965 والمعنونة **حشر مكونات أكثر على الدوائر المتكاملة** (*Gramming More Components onto Integrated Circuits*). توقع مور أنه مع الصقل الإضافي لعملية استنساخ الترانزستورات سيستمر عددها بالتضاعف مع كل جيل تالٍ من التكنولوجيا، وأن قوة الاحتساب للرقاقة ستزداد بالنسبة نفسها.

ودعت الصحافة ذلك بـ «قانون مور» (Moore's Law) وبقي الاسم.

وعندما أعلن مور توقعه كان عدد الترانزستورات عل الرقاقة ثلاثين، أما اليوم فعددها يناهز المليار. إن النمو المتواصل والسريع الذي لاحقه مور استمر بكامل زخمه لأربعة عقود بسرعة وبراعة، بحيث تضاعف عددها على الرقاقة كل ثمانية عشر شهراً منذ الستينات. والنتيجة كانت حواسيب منتشرة زهيدة الثمن وصناعة أشباه موصلات تصل إلى مئات مليارات الدولارات.

والطباعة بتقنية الليثوغرافيا (Lithography) هي الوسيلة التي وشم العدد الهائل من الترانزستورات المتماثلة دفعة واحدة على خلفية سيليكونية عذراء ذات سطح ذري أملس. وتوفر هذه التقنية أيضاً وسيلة لربط الترانزستورات سوية لصنع دوائر ذات معنى. وهذا النوع من الطباعة يشبه الطباعة بالشبكة الحريرية التي تستخدم القالب أو الإستنسل (Stencil)، وهي طريقة لطبع الخيال مرات لا تحصى. ويمكن لعدد من الإكساءات المتراصفة بدقة توليد شكل معقد متعدد

---

(1) Gordon Moore, «Cramming More Components onto Integrated Circuits,» *Electronics*, vol. 38, no. 8 (1965), pp. 114-117.

الألوان، وهناك مثلاً هيلو كيتي (Hello Kitty) بألوانها البيضاء والوردية جالسة في الوسط وصديقها (تيدي) ذو اللون الأزرق الفاتح جداً جالس على مسافة منها.

وفي الطباعة الليثوغرافية الضوئية، بصورة مشابهة ومن خلال خطوات بسيطة من عمليات الطباعة مع مراصفة كل صورة مع التي سبقتها، يمكن أن نحصل على دوائر معقدة. وتتيح الطباعة بالشبكة الحريرية تحديد شكل معقد: ستة خصل من شعر الذقن وعينين ومن دون فم في تعريض واحد. ويتم في الطباعة الليثوغرافية الضوئية الطبع على الطبقات السفلى عندما تمر الفوتونات خلال الفتحات في الإستنسل، محددة بدقة وبصورة مكررة ملايين الترانزستورات. وتعاد العملية بعد فترة وجيزة على الرقاقة التالية في خط التجميع.

وكما في التصوير الفوتوغرافي، يحوِّل التغير الذي يسببه الضوء في المنطقة المعرضة رقصةً للضوء إلى مطبوع مادي حقيقي. ويتم تحويل الصورة الضوئية على السطح الذي تحته مثل الدوائر المقتطعة التي تتكون عندما تشرق الشمس خلال الفسح المدورة التي تحدث في الغمام الإنجليزي المستديم. وفي الطباعة الضوئية تعرف المادة الحاسة ضوئياً التي تحول الضوء والظل إلى مادة ملموسة أو غائبة باسم مقاومة الضوء (Photoresist). وما أن تتعرض مناطق من هذه المادة للضوء حتى يذيب محلول تظهير البوليمر الذي يبقى في موضعه إذا لم ير شيئاً غير العتمة. ويصبح الشكل من الضوء مقلوباً غشاء بلاستيكياً صلداً على سطح الرقاقة الوليدة. ويتم صنع الأسلاك التي تربط الترانزستورات سوية بواسطة تساقط نثار الألمنيوم على الرقاقة وبروز تلول فضية عليها بعد ذلك.

ولكي نفرض على البوليمر الحساس ضوئياً الشكل الذي

سيصبح نموذجاً للأشكال التالية تجتمع أسراب كبيرة من الفوتونات التي أطلقت من مصباح أو لايزر من خلال عدسات على سطح الرقاقة. وتتمكن هذه الفوتونات من تكوين شكل متكامل على السطح العلوي للرقاقة، لأن جسيمات الضوء تقنع بالانطلاق كونها تشكيلة تعنى كل منها بأداء عملها وحسب، فالفوتونات التي لا تحمل أي شحنة لا تكترث بوجود جسيمات أخرى من النوع نفسه. وهذه الخاصية، أي التوازي الشامل لأشعة الضوء، تُستغل بالأحرى في الطباعة الليثوغرافية الضوئية، فلو قمنا بتصور قيمة كل تعرض طباعي لنقطة ضوئية (Pixel) كونها معلومة معدة للإرسال، فإن أنظمة الطباعة الليثوغرافية الضوئية المعاصرة ستقوم بإرسال مئة مليار بث من المعلومات كل ثانية.

إن طريقة الطباعة الليثوغرافية الضوئية المستوية تمثل تطبيقاً ممتازاً لقانون مور لنمو الكثافة على الرقاقة. ما أن يخترع مصمِّم حواسيب تصميماً جديداً للرقاقة حتى يتم توليد قوالب جديدة، ويتبع ذلك أشكال المناطق نصف المضللة التي تحدد تفاصيل الممرات والصدوع لمعالج أسرع وأكثر تطوراً. وبذلك يصبح التصميم مهيئاً للعمل.

تقليص الترانزستورات إلى القياس النانوي

لقد حذّر الباحثون، ومنذ عقود، من الأزمة الوشيكة ومن النهاية المتوقعة لقانون مور. والبرهان الذي يقدمونه بسيط وأساسي وصحيح، فالضوء لا يتألف فقط من جسيمات ـ فوتونات، بل إنه حركة موجية، ولموجاته خاصية انحنائية يحددها طول الموجة. وإذا ما ثبتنا اختياراتنا للطول الموجي ستنحصر قابليتنا لرسم الترانزستورات ضمن جزء من ذلك الطول الموجي، كما أشارت

ريبيكا هندرسون[2] (Rebecca Henderson) من مدرسة سلون (Sloan) للإدارة في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا، في عملها الموسوم بـ **عن دورات الحياة الحقيقية والتخيلية: الشيخوخة الطويلة غير المتوقعة للطباعة الليثوغرافية الضوئية** (*Of Life Cycles Real and Imaginary: The Unexpectedly Long Old Age of Optical Lithography*)، فقد كان المهندسون ناجحون بصورة رائعة في تمديد الحدود العملية لنماذج الطباعة الليثوغرافية بالضوء. وقد تم تحسين الليثوغرافيا باستمرار لتلبية متطلبات الجيل التالي من الرقاقات. وقد قمنا بتقصير طول موجة الضوء المختارة لتُنقل خلال القوالب الطباعة وقد أخذنا خلال هذه العملية بألوان الفوتونات من الأزرق إلى الأزرق الداكن، ووصلنا الآن إلى ما فوق البنفسجي، وهي الأشعة التي تحرق الجلد لكننا لا نكاد نراها بإعيننا. ومع انتقالنا لاستخدام فوتونات تحتوي كمّاً أكبر فأكبر من الطاقة، تصبح الطباعة الضوئية أصعب لكنها لم تصبح مستحيلة بعد.

ولكي يستمر التقدم علينا اختراع عدسات جديدة تستطيع تركيز موجات ضوء فوق بنفسجي ذات طول موجي أقصر وطاقة متزايدة على الرقاقة.

وقد تم أخيراً مضاعفة التمييز البيني بالاستفادة من خواص الموجات الضوئية، فيمكن مثلاً لموجتين بحريتين من الحجم نفسه عند ارتطام إحداهما بالأخرى إما أن تقوي أحدهما الأخرى أو أن تلغيها اعتماداً على توافقهما الزمني والموقعي، فيمكن لقمم

(2) Rebecca Henderson, «Of Life Cycles Real and Imaginary: The Unexpectedly Long Old Age of Optical Lithography,» *Research Policy*, vol. 24 (1995), pp. 631-643.

الموجتين أن تتضاعفا في الارتفاع وأن يتضاعف عمق تعريهما كذلك، محدثين موجة أكثر حدة. البديل الآخر التقاء قمة إحدى الموجتين مع قعر الموجة الأخرى، وبذلك يحدث إلغاء تبادلي. ويمكن استغلال هذه الفكرة لتداخل الموجات في الطباعة الضوئية لزيادة حدة الصورة على الرقاقة: إن التعزيز الانتقائي لموجات الضوء يؤدي إلى تعزيز تعرض مقاومة الضوء، كما يترك الإلغاء المتحكَّم به بالموجات الأجزاء التي يجب عدم تعريضها في عتمة مطلقة.

وقد أصبحت أنظمة الطباعة الليثوغرافية الضوئية مع هذه التحسينات التكنولوجية ممعقدة ومكلفة بصورة لا تصدق: فالأنظمة ذات حجم يضاهي سيارات نقل صغيرة وتتصف بتعقيد ميكانيكي هائل، ويبلغ ارتفاع العدسات المجمعة ثلاثة أقدام وتكلف ملايين الدولارات.

ويمكن لتطورات مختبرية أكثر جذرية أن تؤجل آخر حسرات قانون مور لفترة إضافية.

فالطباعة الليثوغرافية الضوئية باستخدام أقصى الموجات الضوئية فوق البنفسجية ستقلل الطول الموجي للضوء المسلط حالياً خلال الأقنعة الطباعية إلى العُشر. وفي نية هذه التقنية استخدام أطوال موجية للتعريض في المجال بين 11 و13 نانومتر وهي تقل بعشرة مرات عن الطول الموجي للضوء المستخدم في أكثر الأنظمة المستخدمة اليوم تقدماً من أنظمة الطباعة الليثوغرافية الضوئية بالأشعة فوق البنفسجية والتي لاتزال في الطور التجريبي.

وتمتص المواد بما فيها الزجاج المستخدم في العدسات هذه الفوتونات فوق البنفسجية عالية الطاقة من دون هوادة. لذا، تصمَّم أنظمة الأشعة فوق البنفسجية القصوى للعمل لا اعتماداً على الضياء

المنحني من خلال عدسات، بل على الضياء المنعكس من خلال مرايا مقوّسة. والمرايا ذاتها ليست اعتيادية، فالطلاء المعدني قليل السمك سيمتص جزء كبيراً من الضياء فوق البنفسجي، لذا فالبديل هو أكداس معقدة مقوسة متعددة الطبقات تقوم بحرف الضوء. هذه التقنية في الحقيقة غير متكاملة حتى اليوم، ولا تمتلك قابلية العكس العالية المطلوبة، ويجب أن يكون عدد طبقات الكدس في الحد الأدنى، بحيث تخفف كمية الضوء الثمين المفتقدة. وأخيراً فإن صنع مصدر كفوء للفوتونات النقية والبراقة في المدى فوق البنفسجي الأقصى لايزال ذاته موضع بحث.

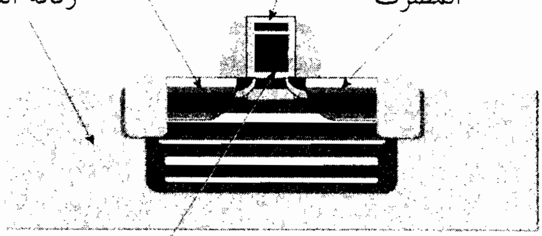
يمكن أيضاً استخدام أشعة إلكترونية لعمل أشكال على الرقاقات السيليكونية، لكن يجب في هذه الحال تدوين المعالم واحدة واحدة. ويمكن للطباعة بالأشعة الإلكترونية الوصول بدقتها إلى القياس النانومتري، وذلك نتيجة خواص الطول الموجي للأشعة الإلكترونية البالغ بضعة نانومترات أو أقل، وهو أقل بكثير عن الطول الموجي للفوتونات البالغ عدة مئات من النانومترات.

وهذه التقنية موضع استخدام واسع اليوم لصنع الأقنعة الأصلية التي تستخدم آلاف المرات بطبع عدد لا ينتهي من الرقاقات بالطباعة الضوئية. هذا هو الاستخدام الأمثل للطباعة بالحزمة الإلكترونية: أي المسح بالحزمة لصفٍّ إثر صف، لتحديد كل مَعْلم بالتعاقب، وهي طريقة مثالية لعمل قناع واحد. وهي بذلك مناسبة جداً لعمل دوائر تجريبية في المختبر. ولا يستفيد هذا النوع من الطباعة مع ذلك من خاصية التوازي الضوئية المثالية للإنتاج الكثيف للدوائر المتماثلة، فالطباعة بالحزمة الإلكترونية تستخدم راهباً واحداً مع ريشة للكتابة، أما الطباعة الليثوغرافية الضوئية فحرية بأن تجعل غوتنبرغ فخوراً بها.

إصلاح الترانزستورات الناضخة: استدعاء ميكانيكيِّ الكم

إن حدود إمكانيات الطباعة الليثوغرافية ـ حتى ولو تبين أنها أكثر تسامحاً وأكثر تقبلاً للتحسينات الهندسية عما اعتُقِد في الأصل ـ لا تعطي إلا حلاً لواحد من التحديات لديمومة قانون مور، فالطباعة الليثوغرافية المحسَّنة تعطينا ترانزستورات أصغر، لكن هل ستعمل الترانزستورات الأصغر دائماً بسرعة أعلى وبأداء أفضل؟

وبُعد واحد محفور باستخدام الطباعة يحدد المدة الزمنية لمرور الإلكترون خلال الترانزستور. إن طول البوابة يصف امتداد هذا الخزان الحرج الذي تفصله أقفال متجاورة في قناة مسار الإلكترون، فالبوابة تحرر أو تخنق تدفق التيار من المصدر: وبذلك تتقاطر الإلكترونات التي تم إطلاقها نتيجة ذلك في المصرف الذي تتجمع فيه. وما يحدد سرعة انطلاق الإلكترونات هو الخواص شبه الموصلة للسيليكون. ومع تحديد السرعة المسبق تقوم الإلكترونات بعبور المجرى خلال وقت يحدده طول البوابة. ويسعى الطباعون للتحكم بهذا البعد الحاسم لطول البوابة لتأمين العبور السريع للإلكترونات بكل بساطة من خلال تقصير مسارها.



ترانسستور يتم التحكم فيه بتدفق الالكترونات بين المصدر والمصرف بواسطة البوابة. وتطبع العديد من هذه الترانسستورات مرة واحدة على رقاقة واحدة ويجري ربطها بعد ذلك لعمل دائرة معقدة (بموافقة من مجلة *Nature*)

إن العلاقة العمودية بين البوابة والمجرى مهمة أيضاً[3]، فالصفة المميزة للتكامل الإلكتروني المتراص ـ القابلية على تحديد ملايين الترانزستورات على رقاقة واحدة باستخدام عدد قليل من الخطوات ـ متأتية من حقيقة أن الطباعة يمكن أن تستخدم لتحديد المعالم الجانبية المتميزة ملايين المرات في عملية تعريض واحدة.

وعلى النقيض من ذلك فإن الشطيرة (الساندويش) العمودية للأداة هي ذاتها في كل موضع وأن اتساقها أمر إلزامي بصورة مطلقة. وهناك فاصل في الاتجاه العمودي بين البوابة والمجرى بقطعة رقيقة من مادة عازلة كهربائياً تم تدبيرها بإمرار الأوكسيجين بدرجة حرارة عالية على السيليكون لتحويل طبقة رقيقة منه إلى زجاج. ولما كانت أطوال البوابات المحددة طباعياً تتناقص باستمرار لذا وجب إنقاص سمك الطبقة المؤكسدة هذه، وتلك هي الظاهرة المعروفة باسم «ملائمة القياسات» (Scaling)، فالترانزستورات يجب أن تحافظ على نسب هندسية محددة.

وهناك ما يدعى دليل البدن ـ الكتلة (Body-Mass Index) أو (BMI)، وهو يتراوح بين 18,5 و25 عادة، وأي نسبة أخرى ستعيق عمل الترانزستور. ويتوقع خبراء الصناعة أن البوابات سيتطلب منها أن لا يتجاوز 35 نانومتر في سنة 2012 ولكي تكون قياساتها متلائمة يجب أن يتجاوز ارتفاعها خمس ذرات. ولقد تمكن صناع الرقاقات، من أمثال Intel وIBM لحسن الحظ من امتلاك تحكم على طريقة صنع البوابات، وهم يلبون هذه المتطلبات القاسية اليوم.

---

(3) Max Schultz, «The End of the Road for Silicon?» *Nature*, vol. 399 (24 June 1999), pp. 729-730, and Seth Lloyd, «Utimate Physical Limits to Computation,» *Nature*, vol. 406 (31 August 2000), pp. 1047-1054.

ويتيح التحكم الدقيق على كيمياء تحويل الطبقة الرقيقة من السيليكون إلى رمل، هذا التحكم المتكامل على الذرات. وعلى أي حال فالأدوات التي نحصل عليها عندما تصنّع بطريقة متقنة تكون سمك قليل إلى درجة تعاني معها من سلوكية موجات الكم الميكانيكة للإلكترونات.

وظاهرة الكم، وهي رنين موجي للإلكترونات يشبه أوتار الغيتار، ستمثل فرصة فيما لو كانت الترانزستورات الإلكترونات في وضع يتيح لها الاستفادة من تأثيرات الكم. لكن السعي الذي لا يكل عن قانون مور وضعها على مسار محدد بحيث إن أداء الترانزستورات التقليدية يعاني عندما تبدأ ميكانيكا الكم بلعب دورها، فالإلكترونات تنضح خلال البوابات ذات السمك فائق النحافة بواسطة النفاد الميكانيكي للكم، لأن الموجات الإلكترونية تكون سائدة في كل موضع، أي على جانب البوابة وجانب المجرى للعازل البوابي. وإذا ما استحثّ نفاذ إلكترون واحد تدفق إلكترونات أخرى، فإن انهماراً متزايداً للإلكترونات يمكن أن يحدث مقعقعاً بين البوابة والمجرى. وهذا الشرب الكارثي هو عكس المطلوب لأن العازل البوابي موجود لعزل البوابة عن المجرى. تصور قناة مائية حيث تبدأ المتحكمات الهيدروليكية التي ترفع وتخفض بوابات الإقفال فيها بالتسريب، وحتى أن الاحتفاظ بمستوى الماء تحتاج إلى الطاقة. وفي الدوائر الإلكترونية الساخنة أكثر مما يجب والمتعطشة للطاقة يكون هذا ثمناً باهظاً يجب دفعه.

وقد قام الباحثون بإطلاق بحث عن مواد تتيح لطبقات أسمك من المواد لعزل البوابة عن المجرى وتمنع التسرب في حين تؤمن العمل السريع. وتتيح هذه المواد تطبيق مجموعة مختلفة من قواعد ملائمة القياسات، كما هي الحال عند شخص يتألف معظم جسمه من العضل ويمكن في حال التعايش مع نسبة أعلى من المعدل لدليل

بدن ـ كتلة، فالممثل براد بيت (Brad Pitt) الذي طوله 183 سنتمتراً ووزنه 92 كيلوغراماً هو ذو وزن زائد، ولا يقل عن مفرط السمنة إلا بنقطتي دليل بدن ـ كتلة). والعوازل ذات الحجم الأكبر يمكن أن تمدد في الفرض المتواصل لقانون مور(4). لكن هذه المواد على أي حال لا يمكن تشكيلها بسهولة عوازل البوابات الزجاجية الخفيفة جداً والتي يتم وضعها في محلها بإمرار الأوكسيجين على السيليكون. إن قابلية تحويل شكل المادة شبه الموصلة، أي السيليكون، إلى مادة رملية عازلة هي واحدة من أكثر أعطيات الطبيعة قيمة لصناعة رقاقات الحاسوب.

إعادة تصميم الحواسيب باستخدام الترانزستورات النانوية

إن المهندسين الذين استمروا في مضاعفة كثافة رقاقات الحاسوب كل ثمانية عشر شهراً، ظلوا طوال أربعين سنة أيّدوا فيها ملاحظات غوردون مور المبكرة، يُدْهِشون من يعتريه الشك، فقد قاموا ـ من خلال تحسين الطباعة وتبديل هندسة الترانزستور واختراع مواد أكثر كفاءة للبوابات ـ بتحديد إمكانيات هندسة الدوائر المدمجة إلى حدود أبعد بكثير عما اعتُقِد أنه أساسي قبل عقد من الزمن. وحتى قبل أن يصطدم رأسنا أولاً بجدار القلعة الصلب للحدود الفيزيائية، وأينما تكمن هذه الحدود على وجه الدقة، يمكن أن نغوص أولاً في الخندق المحيط لنتعرض لقضم الأسماك المتوحشة. إن تصنيع الدوائر المدمجة ذات السرعة والتطور الكافي لكي تلبي شهيتنا المتعاظمة باستمرار سيصبح بالغ الصعوبة، ولذلك بالغ الكلفة. وحتى في يومنا هذا تبلغ كلفة إقامة مصنع للرقاقات نحو أربعة

---

(4) Clemens J. Forst [et al.], «The Interface between Silicon and a High - K Oxide,» *Nature*, vol. 427 (1 Januray 2004), pp. 53-56.

مليارات دولار. ويتقلص عدد الشركات القادرة على التنافس مع هكذا إمكانيات وتتزايد ممانعتهم لتقبل مخاطر الاستثمار.

وجاء تأثير التقنية النانوية ليس من الحفر من القمة بل من زرع البذور وإنمائها من القاعدة صعوداً ويمكن لهذا أن يقلب الرقاقات عاليها وسافلها.

والباحثون يسعون إلى اقناع الطبيعة لبناء حواسيب من خلال التنظيم الذاتي للجزيئات، فقد اقترح كل من آفي أفيرام (Ave Aviram)، وهو يعمل الآن مع IBM في يورك تاون هايتس (Yorktown Heights) ومارك راتنر (Mark Ratner) عندما كانا في جامعة نورث وسترن في إيلينوي نوعاً من الدايود (Diode)، وهو أداة بدائية بالنسبة للإلكترونات بدرجة تفوق حتى الترانزستور، مبني على أساس طبقة من الجزيئات المفردة وليس على أساس البلورة شبه الموصلة (Semiconductor Crystal). وتصنع الديودات من السيليكون بوضع قطعتين من المواد شبه الموصلة بتماس تمتلكان تآلفاً مختلفاً للإلكترونات، فواحدة من هاتين المادتين ستسبح في وفرة من هذه الجسيمات ذات الشحنة السالبة بينما تعاني الأخرى من ندرة شديدة. وإذا ما أجبرت القوة الكهربائية الإلكترونات بعبور نقطة الاتصال بين الأداتين فسينتج عن ذلك شلال غني من التيار، وسيتم وصل الأنيما (Anima) والأنيموس(*) (Animus)، أو أنّ ين (Yin) سيكمل يانغ(**) (Yang). وعلى نقيض ذلك، إذا ما سلطت فولتية كهربائية

(*) الأنيما (Anima): تشخيص لكافة النزعات النفسية الأنثوية في دواخل الذكر، أي أنها الرمزية الأنثوية الأصلية في لاوعي الرجل. أما الأنيموس (Animus) فهو تشخيص لكافة النزعات النفسية الذكرية في دواخل الأنثى، أي أنه الرمزية الذكرية الأصلية في لاوعي المرأة. وكان عالم النفس كارل يونك هو الذي وضع هذه المفاهيم في السايكولوجيا التحليلية.

(**) ين ويانغ (Yin-Yang): يمثل الفهم الصيني القديم لكيفية عمل الأشياء. =

في الاتجاه المعاكس لجعل كل جانب أكثر شبهاً بذاته، فسوف لن يكون هناك أي تدفّق تقريباً، فالديودات التي تستجيب بطريقة مختلفة للقوى الكهربائية من قطبيات مختلفة، أي موجبة مقابل سالبة تستجيب بحماس للجزرة لكن العصا لا تحركها.

والطبيعة القطبية للدايود تأتي من عدم التناسقية التي بنى بموجبها، فالوجود هكذا اختلاف بين جانبيه يتواجد أيضاً تفضيل قوي للتدفق بأحد الاتجاهين مقارنة بالاتجاه الآخر، فالدايود عبارة عن غرفة نصفها مملوء بالمتحررين، بينما يملأ نصفها الثاني بالمحافظين.

إن دفع الأعداء سوية سيضمن تنافر النغمات والضرب على الصدور والإمساك بتلابب الآخرين. وإذا ما فصلت المجموعتان فسينشأ إجماع حذر في الرأي. لذا فإن جمع المجموعتين سوية له تأثير مختلف بدرجة لافتة للنظر مقارنة بالحفاظ عليهما متفرقتين، وذلك بسبب كون الغرفة مستقطبة: إن عدم تناسق الغرفة يتمثل في الفوضى أو الانفراج الذي سيحصل.

وقام أفيرام وراتنر بتصميم جزيئات احتضنت فكرة عدم التناسق نفسها، وسمّيا نهايتي جزيئتهما المانح والمتلقي. وكان المانح غنياً بالإلكترونات بينما تعطش لها المتلقي. وما أن تم اصطناع جزيئات من هذا النوع في محلول سائل حتى أغريت بالاصطفاف على سطح صلب وجميعها باتجاه متشابه. وكان عدم التناسق السائد عبر حقل واسع من الجزيئات سيؤدي إلى تدفق مريح للإلكترونات من المانح إلى المتلقي، إنما ليس بالعكس.

= وحسب هذا الفهم تكون (ين) قائمة وسلبية وباردة وانحدارية وتقلصية وضعيفة، بينما تكون (يانغ) براقة وفعالة ومنطلقة وساخنة وتوسعية وقوية. وهذا المفهوم (ين- يانغ) يمثل أحد أركان الإطار الذهني للتفكير العلمي الصيني في ميادين مثل الطب والبيولوجيا، فالمرض يحدث عند اختلال التوازن بين ين ويانغ.

كان مثل هذا قبل بضعة عقود تمريناً خيالياً ليس إلا، إلا أن بعض الكتل البنائية للإلكترونات الجزيئية قد تم بناؤها في المختبر مؤخراً.

وقام سيز دكر[5] (Cees Dekker) وزملاؤه في هولندا سنة 1997 بعرض ترانزستور كان المجرى فيه مؤلفاً من جزيئة واحدة. وتدفقت الإلكترونات عبر أنبوب نانوي واحد من الكاربون معلق عبر هوة، مشكِّلاً بذلك ما يشبه جسراً من الحبال محفوفاً بالمخاطر بعبور الإلكترونات. ولم يكن بإمكان الإلكترونات مقارنة بالترانزستورات التقليدية إنما مثل وجودها على جسر من الحبال، تجنُّب التأثر بوجود إلكترونات أخرى.

وأدى هذا الواقع إلى ظهور سلوكية مميزة لدى ترانزستورات الجزيئة الواحدة مقارنة بالترانزستورات التقليدية. وعند قياس ترانزستورات دكر في أوطأ الدرجات الحرارية الممكنة أعطتنا أدلة ملفتة للسلوكية تبعاً لميكانيكا الكم، وذلك لسبب استخدام دكر جزيئة واحدة مثالية: وتمثل ذلك في علاقة فجائية مليئة بالمطبات بين التيار والفولتية، فقد بدأ تدفق التيار بصورة فجائية نتيجة العلاقة المكتنزة للإلكترونات التي تأتي مفردة أو ثنائية أو ثلاثية ولا تأتي بنصف حجم. أما المقارنة الاعتيادية فستظهر إيصالاً سلساً.

كانت تجارب دكر تشبه لعبة بولنغ على جسرٍ متدلٍّ من الحبال، فالحبل سيتدلى بصورة بسيطة إذا لم تكن هناك كرات لعب. وإذا ما تم إطلاق كرة لعب بصورة تجريبية عبر الهوة، فإن وزن الكرة سيزيد من تدلي الجسر، وسوف لا تعبر الكرة، أي أن التيار سوف لا يتدفق. وإذا ما أطلقت الكرة بعزم أكبر فقد تمتلك طاقة كافية للتغلب

(5) Sander J. Tnas [et al.], «Individual Single - Wall Carbon Nanotubes as Quantum Wires,» *Nature*, vol. 386 (3 April 1997), pp. 474-477.

على التدلي وستعبر إلى الجانب الثاني، أي إن التيار سيسري، وإذا ما تم إطلاق الكرات بسرعة بحيث توجد أكثر من كرة واحدة على الجسر في الوقت ذاته، فإن تأثيرات كل منها على تدلي الجسر يشوش تجربة الاخريات، فوجود عدد أكبر من كرات البولنغ على الجسر في الوقت نفسه يعاكس التدفق، ويحصل هذا بطريقة تعتمد على العدد الكمي الدقيق ـ واحدة أو اثنتين أو ثلاث ـ للكرات على الجسر. وهذا ما وجده دكر: إن عدد الإلكترونات التي أطلقت سابقاً يؤثر على جريان آخر الإلكترونات التي أضيفت.

ويدل مما اكتشفه دكر ضمناً على أن الإلكترونات كانت تعمل كونها موجات مترابطة ممتدة في الفضاء على طول أنبوبة النانوي البارد. وعبرت موجات الإلكترونات كامل الهوة عبر مسافة 140 نانومتر كانت تفصل نقاط التماس التي وضعها دكر، وهي تشعر بتأثير أي إلكترونات أخرى على المجرى. واعتمدت درجات السلم الكمي لدكر على الإلكترونات متحسسة وجود كل منها من قبل الأخرى بدل كونها تحت تأثير المحيط المجاور لوحده. ووجد دكر أن درجات حرارية واطئة جداً كانت ضرورية في الحقيقة لتبيان تأثيرات ميكانيكا الكم على انتقال الإلكترونات، ففي أوطأ درجة حرارة يمكن إيصال المادة إليها، أي نحو 273 تحت الصفر بمقياس سيلسيوس، كانت درجات سلمه الكمي محددة بوضوح. ومع التسخين درجة حرارية واحدة فقط أصبحت حافات الدرجات أكثر استدارة، ولم يعد السلوك الكمي قابلاً للتمييز مقابل الخلفية التقليدية السلسة: التبني الدافئ لموسيقي البيتلز (Beatles) الآلاتية أغرقت توباك(*) (Tupac).

(*) توباك (Tupac Amarn Shakur): مغن أمريكي أسود اشتهر بغناء (الراب)، وهو كلام مصاحب بألحان صارخة يقع ما بين الغناء وإلقاء الشعر.

ويمثل أسلوب دكر تحدياً عملياً آخر يجب التغلب عليه على الرغم من أنه مستند بطريقة جذابة إلى بناء الطبيعة للكتل البنائية. ويتطلب الأمر وضع جسور الحبال من الأنابيب النانوية بحيث تربط طرفي الهوة وتكون متيسرة لارتيادها من قبل المسافرين من كلا الجهتين. وقام دكرز وزملاؤه في تجاربهم الأولى بنثر تشكيلة من الأنابيب النانوية على رقاقة تحوي آلاف الترانزستورات البدائية: مجموعات من نقاط التماس والأقطاب البوابية لا تفتقد إلا المجرى ذاته.

وسقط على الأغلب لا شيء أو اثنين أو ثلاثة أنابيب نانوية بين نقطتي الاتصال.

ولم يسقط أنبوب نانوي واحد عبر الهوة ليشكل أداة من جزيئة واحدة إلا بالصدفة.

ولم تكن كل هذه الأنابيب النانوية إضافة من النوع الصحيح، فعندما تصنع الطبيعة هذه الجزيئات الطويلة من ذرات الكاربون وتلفها لتشكيل أسطوانة، فهي تلفها بعدد من الطرق، فقد تربط الزاويتين السفليتين سوية، أو قد تلفها بزاوية معينة تغير السلوك الكهربائي للأنبوب النانوي الكاربوني بصورة مفاجئة. وتعمل بعض هذه الأنابيب النانوية مثل المعادن، ناقلة أي إلكترون في مدى البصر من دون تمييز، وتعمل غيرها كأشباه موصلات، ناقلة إلكترونات ذات طاقة معينة فقط. إن أساليب القعر ـ إلى أعلى لاصطناع الأنابيب النانوية الكاربونية ـ انفجار داخل فجوة يتولد عنه سخام من نوع خاص ـ تنتج مزيجاً من النوعين من الأنابيب النانوية. ولصنع ترانزستور باستخدام أنبوب نانوي لا ينفعنا إلا النوع شبه الموصل على أي حال.

إلا أن أسلوب دكر لا ينسجم كما يتضح مع الطريقة التي تبني

بها دوائرنا الكهربائية اليوم، فرقاقاتنا تعتمد على مئة مليون ترانزستور تعمل بطريقة صحيحة ومرتبطة سوية حسب طريقة قابلة للبرمجة. لذا فمن الواضح أن هناك تنافراً بين التكنولوجيا النانوية «من القمة إلى الأسفل» والتقنية المعتمدة على أسلوب «من القعر صعوداً»، وهناك حاجة ملحة لربط النوعين: علينا أن نبدأ بحفر نفق من كل جانب من المجرى لكي نلتقي في الوسط.

برمجة الجزيئات؟

تُستخدم في أحد تفرعات إلكترونات السيليكون، المعروف بتنظيمات البوابة القابلة للبرمجة حقلياً، فكرةُ بناء الرقاقات المنتجة بكثافة ومن ثم برمجة كل منها لاستخدام معين. هل يمكننا فعل الشيء نفسه بالعدد المصنوعة من الجزيئات؟ الطبيعة ستبني رقاقات من خلال التنظيم ـ الذاتي المحفز وستكون كل رقاقة أسوة بكل ما تخلقه مزيدة في نوعها مادياً مثلما تختلف الأشغال الخارجية لبنية الزهور من صنف واحد أو تختلف الأوراق على شجرة واحدة على الرغم من امتلاكها الجينات نفسها.

إن التوائم المتماثلين جينياً يمكن تمييزهم، لأن التغذية مدمجة مع الطبيعة ينجم عنها تغييرات في عالم الطبيعة، فبعد تكليف الطبيعة ببناء رقاقات معقدة إنما غير متكاملة سيقوم مصممو الحاسوب الجزيئي بتنظيم المعالج ـ بما في ذلك العقد التي قد تكون فيه ـ للاحتساب القابل للتكرار.

وقد يكون ذلك بسهولة توجيه الإشارات حول العقد.

تتطلب هذه الاستراتيجية الاعتماد على ديودات جزيئية قابلة للبرمجة كهربائياً[6]: وهي جزيئات مصممة تقوم عند تسليط فولتية

= Charles P. Collier [et al.]: «A [2] Catnane -Based Solid State (6)

عليها بإعادة تشكيل ذاتها بحيث تفضل أو تمنع جريان التيار. وفي إحدى الهيئتين، أي في موقع «أعلى»، ستقوم الحلقات بخنق التيار، بينما ستقوم في موقع (أسفل) بتسهيل جريان الإلكترونات. إن برمجة الأداة ستحدد موقع كل حلقة في حال أو في الأخرى.

لقد قام الباحثون ببناء أدوات إلكترونية جزيئية على هذه القاعدة مستخدمين حركات جزيئات عضوية تدعى روتاكساين (Rotaxane) لإمرار أو إيقاف تدفق التيار الكهربائي. وتقع الروتاكساين بين زوجين من الأقطاب المعدنية مطلوبة لتحقيق التماس الكهربائي، إلا أن هذه الهيكلية على الرغم من ضرورتها جعلت من الصعب معرفة ما سيحدث داخل الأداة على وجه الدقة. وقد تساءل النقاد[7] فيما إذا كانت الفولتيات التي يقصد بها إقفال أو تشغيل الجزيئات قد تكون غيرت خواص الأقطاب المعدنية ذاتها، فمن الممكن لذرات المعدن، في حال تسليط مجال عليها، أن تزحف عبر الفجوة النانومترية مهاجرة لتشكل شعيرات يمكن للتيار التدفق خلالها. إن هذه الأدوات الافتراضية ـ المسربة من خلال قابلية البرمجة ـ قد تعمل، إنما ذلك لا يستند إلى الحركات الرشيقة للحلقات على الجزيئات. إن الأشكال الجميلة للجزيئات المصممة ستستخدم فقط لفصل الأقطاب ولتجميل التصريحات الصحيفة.

كيف ستكون مثل هذه الأدوات والدوائر الجزيئية إذاً حينما

Electronically Reconfigurable Switch,» *Science*, vol. 289 (18 August 2000), pp. = 1172-1175, and «Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates,» *Science*, vol. 285 (16 July 1999), pp. 391-395.

(7) Robert F. Service, «Molecular Electronics; Next - Generation Technology Hits an Early Midlife Crisis,» *Science*, vol. 302 (24 October 2003), pp. 556-558.

تتحقق أساساً للحواسيب؟ فعلى رقاقات السيليكون تكون ملايين الترانزستورات المتماثلة مطلوبة لكنها بمفردها ليست كافية. إن كومة من الخلايا العصبية الرطبة قد تؤلف فماً لكن الدماغ متألف من ارتباطات، وكذلك الترانزستورات، يجب أن يرتبط أحدها بالآخر، وكذلك مع نظام الاتصالات للرقاقة المسؤول عن جلب المعلومات الواجب معالجتها ومن ثم نقل النتائج. ويقترح علماء الحاسوب أن تكون معمارية الدوائر الجزيئية مختلفة من الرقاقات السيليكونية: وقد نكون قادرين على إقناع الطبيعة كي تبني تنظيمات من الترانزستورات الجزيئية، لكن إذا ما قدرنا أن نعهد إليها ببناء رقاقاتنا، فإن علينا التخلي عن إدراتها ـ نانوياً.

وقد ركز ستان وليامز[8] (Stan Williams)، من مختبرات شركة هيويلت باكارد المركزية على بناء حواسيب لا تستخدم ترانزستورات ثلاثية النهايات، كما في مكائن اليوم، بل بالأحرى من خلال ديودات أفيرام وراتنر الجزيئية الأبسط.

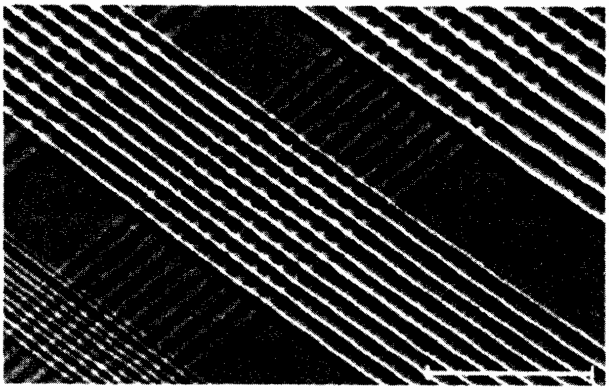
وسيقوم الباحثون ببرمجة رقاقات الحاسوب المصنوعة من هذه الأدوات باستخدام روتين برامجي يؤمن أن الرقاقة تستخدم فقط تلك الأدوات الجزيئية التي تعمل جيداً، متخطية بهذه الطريقة تباين «الجزيئة ـ إلى الجزيئة» في هذه الرقاقات.

لكن هذه التنظيمات للجزيئات لازالت بحاجة لأن تسلك سوية لإنتاج برامجها ولقراءة حال كل جزيئة لوحدها. وقد قام الباحثون في

---

(8) James R. Heath [et al.], «A Defect - Tolerant Computer Architecture: Opportunities for Nanotechnology,» *Science*, vol. 280 (12 June 1998), pp. 1716-1721.

معهد كاليفورنيا للأنظمة النانوية[9] (CNSI) بعرض واحد من الطرق للتعامل مع مشكلة التسليك هذه: وبدلاً من تحديد أسلاك ذات حجم نانوي بالتعاقب مستخدمين شعاعاً إلكترونياً، قام الفريق ببناء قالب ذي حجم نانوي مستخدمين أسلوب «من القاعدة إلى الأعلى»، فقد قاموا بإنماء سندويش نانوي متعدد الطبقات، وكانت طبقات الخبز ذات سمك يبلغ عشرة نانومترات، أما حشوة السلامي فكان سمكها خمس نانومترات. ونشروا عليها المايونيز بهيئة معدن متبخر التصق بالسلامي فقط إنما ليس إلى الخبز في جانبي الساندويش، وبالنظر إلى الساندويش جانبياً، أو أسلاكاً محددة بعرض السلامي وبطول حافة الساندويش. قاموا إثر ذلك بإدارة ساونديشهم إلى جانبه، وحوّلوا المايونيز على طبقة سيليكون تحتية، وقاموا بعملية نشر وتحويل المايونيز مرة أخرى لينتجوا الأسلاك النانوية المتقاطعة، كما في الصورة.



تنسيق لأسلاك معدنية نانومتيرية ـ خط القياس يبلغ طوله 500 نانوميتر ـ ابتدعه باحثون في معهد كاليفورنيا للأنظمة النانوية (بموافقة مجلة *Science*)

(9) Nicholas A. Melosh [et al.], «Ultrahigh - Density Nanowire Lattics and Circuits,» *Science*, vol. 300 (4 April 2003), pp. 112-115.

وقد أظهر الباحثون أن تنظيمات من أسلاك متقاطعة يمكن التحكم بها يمكن أن تصطنع وتشكل على القياس النانوي، تاركين الأمر للطبيعة لتنجز جزءاً كبيراً من العمل. كانت تلك خطوة نحو أساليب ذات كلفة موفية للبرمجة والقراءة للترانزستورات الجزيئية المفردة.

الانتظار بتلهف لزواج الجمال والذكاء

لقد أعطت الإلكترونات الجزيئية حتى الآن نتائج مدهشة وأخرى قابلة للنقاش، فقد عرضت ديودات وترانزستورات تعتمد على الجزيئات والأنابيب النانوية، وحتى على ذرات أحادية. وهذه كلها تبدي طبيعة كمية في درجات حرارية واطئة جداً للإلكترونات، وتظهر سلوكاً معقداً بدرجة خادعة. لكن سلوك هذه الأدوات يبدو في درجة حرارة الغرفة مشابهاً لترانزستورات السيليكون، فيما عدا أن أداء معظم الأدوات الجزيئية في الوقت الحاضر قاصر بدرجة ملفتة للنظر.

وتحتاج الإلكترونات الجزيئية أن تظهر لنا أن عدداً كافياً من هذه الأدوات التي يبدلها المهندسون ويتركون صنعها للطبيعة وتتصل ببعضها بعدد كافٍ من الارتباطات وتبرمج لاحقاً، يمكن أن ينتج عنها دائرة فعالة. وفي حين أن الحواسيب الجزيئية لن تصمم اعتماداً على افتراض رقاقات مثالية ومتماثلة إلا أن على الباحثين إحراز القليل من التحكم على الأدوات الجزيئية وعلى ارتباطاتها.

إن ميدان التجميع الذاتي الموجة سيوفر عندما ينضج تقدماً فائق الأهمية في إنشاء دوائر إلكترونية جزيئية.

إن الاحتساب باستخدام الجزيئات التي تنمّى من الأرض صعوداً بدل استخدام الترانزستورات المحفورة «من القمة نزولاً» يمكن أن ينجم عنه تقدم غير محدود على الرغم من العوائق التي تبدو للعيان.

وما هو أكثر إثارة أن أسلوب «من الأرض صعوداً» يمكن أن يغير طريقة عمل الحواسيب والدور الذي تلعبه في حياتنا. إن الإستخدام الكفوء للجزيئات يعني أن حاسوباً محمولاً (Laptop) يمكن أن يؤدي 10^{51} عملية احتساب كل ثانية على 10^{31} قطعة من المعلومات مقارنة بمثيله اليوم الذي يؤدي 10^{10} عملية في الثانية على 10^{10} قطعة من المعلومات. وهذا يترجم إلى تحسن بعامل يبلغ تريليونات التريليونات على ما نستطيع انجازه اليوم، وليس فقط من خلال مضاعفته كل ثمانية عشر شهراً.

إن المعمارية الجزيئية تجبر المصممين على التفكير خارج الأطر المعهودة حول حواسيب المستقبل. إن أسلوب «من القاعدة صعوداً» يفتح آفاقاً لاستراتيجيات حاسوبية جديدة تتعلم فيها المكائن وتصلح نفسها ذاتياً. وهذه الحواسيب المبنية من خلايا عصبية جزيئية مرتبة بطريقة غير متكاملة ستعطي، مثل الأجناس الطبيعية المتطورة، نتائج بارعة باستخدام أبسط وأصغر كتل البناء. ويمكن عندئذ تصور حواسيب مبنية ليس فقط من قبل الطبيعة بل بالرعاية، وتقوي تجاربها مع العالم حولها بعض الارتباطات الجزيئية، بينما تطمس ارتباطات أخرى. والمكائن التي ستستحصل قد يكون لها شخصيات متباينة وإمكانية مبنية فيها تصل إلى الإتقان من خلال التربية والتثقيف: احتساب غريب الأطوار. صغيرة الحجم ومرنة وعضوية ويمكن أن يلبسها الشخص: ولماذا لا تصطحب حاسوبك إلى عرض للباليه؟

ربما سيتطور ليصبح الباريشنيكوف(*) (Baryshnikov) القادم، أو قد يكرس حياته لتربية الجيل القادم من الحواسيب الجزيئية.

(*) ميخائيل باريشنيكوف: راقص باليه مبدع روسي الأصل أمريكي الجنسية.

الفصل الثامن

التفاعل

نتفاعل اليوم مع أجهزة المعلومات (الحواسيب والهواتف والمساعدات الشخصية الرقمية) حسب شروطها وليس حسب شروطنا. ونحن نتكيف مع متطلباتها الممتزجة مع شركة تكنولوجيات الماضي التي عفا عليها الزمن: شكل وترتيب حروف لوحة المفاتيح والصلابة المستوية للوحة عرض.

لماذا لا تنحني أجهزة المعلومات لمتطلباتنا؟ حاسوب مفصل حسب الطلب حجم (42 طويل[*]).

إن هذا يشابه قصة من الخيال العلمي، لأن مواد تصنيع الإلكترونيات هي صلبة مادياً محفورة من بلورات مثالية من السيليكون. والذي لا يمكن تجنبه أن تكنولوجيا المعلومات والنقل والتعقيد المادي يتماشيان سوية.

هل سنقوم إلى الأبد بحمل حواسيبنا المنقولة الثقيلة وربما نفتقد تناسق كتفينا بوزنها وعدم ملائمتها؟ وهل ستكون هذه الحواسيب بسعة أحضاننا دائماً؟

(*) يقارنه المؤلف هنا بقياس بدلة رجالية.

لا ليس من الضروري أن تكون كذلك. فرقاقات الحاسوب بالغة القوة صغيرة الحجم اليوم بدرجة لا تعير معها إلا أهمية قليلة لعدم مرونتها المادية وكيفية تأثيرها علينا. إن الجزء الذكي من الحاسوب يصغر ألف مرة عن إبزيم حزام من تصميم غوتشي (Gucci). إنها الشاشة ولوحة المفاتيح اللتان تشكلان الجزء الأكبر من وزن الحاسوب: وهي الأجزاء التي نتفاعل معها، إذ إنها كبيرة الحجم مثلنا من لوحة مفاتيح تتناسب مع حجم اليد إلى شاشة بحجم ساحة البصر.

لكن إذا كانت أجزاء الحاسوب التي تتفاعل معها بنفس حجمنا، فلماذا لا نستطيع أن نجعلها جزءاً منا؟ ألا نستطيع ربطها مع حركاتنا وإلحاقها بحواسنا؟

ربما نستطيع أن نطمر لوحة مفاتيح في أصابعنا، أو أن ننسج حواسيب في القماش، فالترانزستورات المصنوعة في البوليمرات يمكن أن تكون سلسة ومرنة: ملبوس وسطي بين الملابس الداخلية والقميص. قم بإنزال لحن ثونغتون (Thongtone) من على موقع لاسلكي.

ما أن نبدأ بصياغة تقنية المعلومات في أجسادنا حتى نطالب بالاتصال المباشر مع حواسنا. إن 99 في المئة من الضياء الصادر من شاشة الحاسوب اليوم يذهب سدى، أو أن يراه على سبيل المثال ركاب الطائرة الجالسين بجانبنا. لماذا لا نوجد عرضاً يوصل الضياء مباشرة إلى أعيننا، ربما من خلال عدسة لاصقة أو من خلال مزدرع في الشبكية؟ أو لنلغِ الوسيط ونقمْ بدل ذلك بإرسال الإشارة مباشرة إلى العصب البصَري، ثم سأقوم بإرسال الإشارات من عصبي البصري إلى عصبك البصري، وأخيراً فإننا سنرى من عين إلى عين.

تقوم أجهزة المعلومات اليوم بتعزيز قابلياتنا الإنسانية المحدودة، محولة ذكرياتنا ذات الأرقام السبعة إلى 40 مليار بايت، موسِّعة قدرتنا على إيصال الكلام دون تحريك شفاهنا من مسافة 20 يارده إلى عشرة آلاف ميل. لكن هناك الكثير الذي يجب عمله غير ذلك: وسع مدى الرؤية إلى منطقة دون الأحمر حيث نحن مصابون بالعمى، وأعِدِ البصر لأولئك الذين فقدوه وأعطه لأولئك الذين لم يعرفوه.

لا يجب أن نحدد دور أجهزة معلوماتنا على تحسس العالم حولنا، بل علينا توسيع دورها ليشمل المبادرة بالأفعال: قميص داخلي لا يقتصر عمله على قياس عدد نبضات القلب بل عليه أن يتقلص بقوة ليعيد الحياة لمن يعاني من نوبة قلبية. إن بدلة عضلية يتم التحكم بها من خلال حركاتك وأفكارك قد تضخم قوتك ألف مرة.

أن تلبس ذهنك على كمك

إننا بحاجة لمواد تستطيع القيام بالعمليات الحسابية والتحسس والعرض والاتصال والعمل، وإلى قوة لا تعتمد عل رقاقات السيليكون فقط بل تستخدم مواد خفيفة الوزن ومرنة يمكن أن تدمج في حيواتنا من دون درز كما يقال.

لقد قامت التكنولوجيا النانوية اليوم بإضفاء الشكل على الطرق الأكثر تقليدية التي نستخدمها لرؤية المعلومات والأشكال، فالعرض بواسطة البلورات السائلة (Liquid Crystals) في حواسيبنا المحمولة مثال للهندسة الجزيئية الرائعة وهي تعمل. والبلورات السائلة هي تجمعية من الجزيئات التي تتراصف في اتجاهات محددة بسبب شكل الجزيئة وبنيتها الإلكترونية. وتؤثر كيفية توجه هذه الجزيئات بالنسبة إلى بعضها البعض على نفاذ الضوء أو عدمه خلال سلسلة من المرشحات المنتخبة بعناية تُعرف بالمستقطبات (Polarizers).

إن تسليط فولتية كهربائية على نقطة ضوئية في شاشة بلورية سائلة يغيِّر كيفَ، ويقرِّر ما إذا كانت الجزيئات المصممة هندسياً ستتراصف، وبذلك تقرر الجزيئات ما إذا كان الضوء سينتقل من داخل الشاشة إلى عين المشاهد. إن البلورات السائلة هي اصطفاف لمجموعة راقصين جزيئيين ذو تزامن متكامل للحركات الراقصة بين أفراده.

إن التقدم في الأنابيب النانوية الكاربونية يمهد الطريق لجيل جديد من شاشات العرض البراقة المستوية المرئية بزاوية واسعة. وتعمل شاشات انبعاث-المجال (Field-Emission) للعرض بموجب جزء كبير من أسس عمل التلفزيونات التقليدية: صمامات الأشعة الكاثودية، لكنها لا تتطلب إلا النزر اليسير من الطاقة، ويمكن أن تصنع بسمك يبلغ ثلاثة مليمترات، أو ثُمُن الأنش، فسيسارع مجال كهربائي الإلكترونات نحو الفوسفوريات، وهي مواد تتألق ساطعة باللون الذي يتم اختياره. وكل نقطة ضوئية في هذه الشاشات صنعت من عدة آلاف من النهايات ذات الحجم النانومتري يمكن أن تنطلق منها الإلكترونات بسهولة. وينتج عن النهايات فائقة الحدّة نسبة إلى فولتية كهربائية معينة أكبر قوة كهربائية ممكنة تجر الإلكترونات من النهايات. وتوفر الأنابيب النانوية الكاربونية وسائل طبيعية لصنع أشد النهايات الممكن تصورها حدةً، وكل ذلك خلال عملية «من القعر صعوداً» للتجميع الذاتي، بدل متطلب شحذ النهايات اليدوي. وقد قامت كل من سامسونغ وموتورولا بإنتاج نماذج ريادية متقدمة، مثل شاشة عرض سامسونغ كاملة الألوان قطر 38 أنش من نوع انبعاث - المجال التي تعتمد على الأنابيب النانوية الكاربونية.

وتقدم الشاشة زوايا عرض واسعة واستهلاك قليل للقوة وإمكانية إنتاجها بكلف زهيدة.

ويقدم ميدان الإلكترونات العضوية الآن، وهو استخدام أشباه الموصلات المعتمدة على الجزيئات العضوية وهو الصنف الواسع من الجزيئات التي تشكل مادة أجسامنا، إمكانية إنتاج وسائل عرض مرنة وحتى إنها يمكن أن تلبس، فأشباه الموصلات العضوية يمكن أن تطلى على رقاقة أو قماش أو على صفيحة كبيرة من اللدائن.

والجزيئات يمكن نشرها بصورة سائل من النوع سريع التبخر يكون سمك الغشاء الذي تتركه قليلاً وأملس ويخضع لتحكم كامل. توضع قطرة على عينة تغزل وتنتشر القطرة بهيئة غشاء رقيق أملس. ويمكن تشكيل طبقات ذات سمك لا يتجاوز جزيئات أو بسمك يبلغ عدة مايكرومترات لتغطية السطوح بهذه الطريقة. ويمكن أيضاً الكتابة بهذه الطريقة باستخدام طباعة نفث الحبر (Ink-Jet) لشاشات حسب الطلب واحدة تلو الأخرى لابتداع عروض مفصلة حسب مقاسات لابسها. وتختلف الأدوات الإلكترونية كبيرة الحجم المصنوعة من اللدائن مثل الخلية الشمسية المرنة المعروضة صورتها في الفصل الرابع بصورة قوية عن البلورات القاسية المستخدمة لصنع رقاقات الحاسوب.

إن شكل السحب الإلكترونية الزغبية التي تدور حول الجزيئات يحدد السلوك الكهربائي والضوئي لأشباه الموصلات العضوية، إذ لا يجب أن ترتبط الإلكترونات بطريقة وثيقة مع الرباطات المفردة على طول السلاسل البوليمرية، بل يجب بدل ذلك أن تمدد أنفسها في الفضاء. ويمكن للموجات الإلكترونية أن تكون في كل موضع فوراً فهي ليست جسيمات اعتيادية متفردة مثبتة في موقع واحد. والموجات الإلكترونية عامة الانتشار مثل قرد الـ «أورانغوتان» (Orangutan) طويل اليدين الذي يستطيع الانتقال بسرعة أكبر بكثير عبر قضبان فوقية مقارنة بفأرة مدغشقر الليمورية، تعتبر أحسن مادة ناقلة، لأن

الإلكترونات المنتشرة تتحرك بسرعة وتساعد على جريان تيار غزير باستهلاك قليل للطاقة. وتستخدم المواد شبه الموصلة اللدائنية سلاسل طويلة من كتل البناء متكررة الجزيئات، مصممة خصيصاً لتعمل على نشر الإلكترونات على طول امتدادها. ويجب التحكم أيضاً بغزارة الإلكترونات، إضافة إلى شكلها. وكان الباحثون قد اكتشفوا في السبعينيات كيفية وضع إلكترونات إضافية في اللدائن لزيادة إيصاليتها مليار مرة. إن اظهار إمكانية جعل اللدائن ذات قابلية إيصال يمكن التحكم بها أمّنت منح جائزة نوبل للكيمياء سنة 2000 لكل من آلن ج. هيغر (Alan J. Heeger) وآلن ج. ماكديارميد (Alan G. Macdiarmid) وهيديكي شيراواكا (Hideki Shirawaka).

صنع شاشات العرض المرنة

تم مؤخراً استخدام تكنولوجيات الطباعة اللدائنية لصنع عروض ملونة رخيصة ومرنة وخفيفة الوزن وباعثة للضوء. تلك هي خزانة العرض المثالية لما تستطيع الإلكترونيات العضوية تقديمه، وهو استخدام لا تقلل من قيمته ما فيها من قصور.

إن سرعة جريان الإلكترونات في اللدائن حتى اليوم بطيئة جداً مقارنة بسرعة جريانها في رقائق الحاسوب، لكن التراسل مع الكائنات البشرية لن يحتاج أيّاً من هذا، فشاشات عرض الحاسوب وأجهزة الفيديو تجدد صورها بوتيرة ربما تبلغ خمسة وسبعين مرة في الثانية، وبإمكان أشباه الموصلات الموجودة الآن العمل بسهولة في هذه السرع المتواضعة.

وتعمل الحواسيب المنقولة اليوم بترشيح ألوان معينة من إنارة خلفية، وتسمح لألوان الأحمر والأخضر والأزرق بالعبور خلال نقاط ضوئية مفردة يتم التحكم بها. وتعتمد الصورة بقوة على الزاوية التي

يتم النظر من خلالها إلى هذه الصور. وتنتج الصور بدل ذلك ضوءاً مباشراً من اللون المطلوب بصورة نقية في كل نقطة ضوئية. وهناك أسلوب آخر متاح: لا تنتج أي ضوء بتاتاً، لكن وببساطة استبدل انعكاس الضوء بالطريقة التي يعمل بها الحبر على الورق، وبذلك تغير كيفية امتصاص أو انعكاس الضوء من الغرفة. وتقوم شركة (E-ink)، التي تصنع العارضات المعتمدة على هذه القاعدة، باستخدام حركات متحكَّم بها لخرزات دقيقة لتبديل مظهر النقاط الضوئية من الأبيض إلى الأسود. وهذه العروض القابلة للبرمجة هي قيد الاستعمال الآن في المخازن الكبرى.

واللدائن التي يمكن أن تحمل شحنة كهربائية هي في قلب جيل جديد من وسائل العرض خفيفة الوزن، فقد وجد ريتشارد فريند[1] (Richard Friend) من جامعة كامبردج سنة 1989 أن البوليمرات عندما تزوَّد بالطاقة الكهربائية يمكن أن تنتج الضوء. وكان هناك في قلب الأداة[2] طبقة من بوليمر شبه موصل تم منذ ذلك الحين هندسة جزيئاتها لينتج عنها ضوء بتشكيلة من الألوان المختارة وبكفاءة عالية. ولما كانت الألوان المختلفة متعلقة بفوتونات ذات طاقات مختلفة لإلكترونات على سلاسلها، مثلما تدعم أسلاك الغيتار ذات التوتر المختلف ذبذبات صوتية مختلفة.

وتمتلك كل نقطة تنتج الضوء في قلبها طبقة وسطى تحتاج أن تزوَّد بقوة ويجب أن يخرج منها ضوء. والطبقة السفلى، أي طبقة

---

(1) J. H. Burroughes [et al.], «Light-Emitting Diodes Based on Conjugated Ploymers,» *Nature*, vol. 347 (11 October 1990), pp. 539-541.

(2) P. L. Burn [et al.], «Chemical Tuning of Electro-Luminescent Copolymers to Improve Emission Efficiencies and Allow Patterning,» *Nature*, vol. 356 (5 March 1992), pp. 47-49.

الأساس، هي المنصة المادية التي تجلس عليها الأداة. وفي حالة العارضة المرنة تكون هذه هذه الطبقة من مادة لدنة قابلة للطي ويجب أن تكون شفافة لكي تسمح للضوء المنتج لينبثق. ويوجد على طبقة الأساس ساندويشة من الطبقات، فشريحتا الأسفل والأعلى من الخبز توصلان التيار الكهربائي إلى الطبقة الفعّالة المحتواة بينهما. أما الفصل فيحدث في البوليمر الذي يطلق الضوء. يتم حقن تيار من الإلكترونات ويجري بتأثير القوة التي تحدثها الدائرة ويطلق طاقته بشكل فوتونات، ويمكن لكل جزيئة مولدة للضوء تكرار هذه العملية ملايين المرات كل ثانية.

ويعتبر البوليمر المولد للضوء بحد ذاته انتصاراً للتصميم الجزيئي، ويحدد تركيبه الكيميائي لون الضوء المنبعث بطريقة يفهمها العلميون، مما يمكّنهم من تصميم الجزيئات بموجب مواصفات محددة. وقد تم إنتاج بوليمرات مولِّدة للضوء من النوع القابل للطبع(3) لتغطي المدى بين 400 و800 نانومتر، وذلك ما يتوافق مع الألوان التي تستطيع أعيننا رؤيتها. وتميل وحدات مكررة أكبر إلى إطلاق موجات أطول من الضوء تميل نحو الألوان الحمراء.

والطريقة الأخرى لتنظيم الألوان توحُّد البوليمرات طويلة السلسلة مع الجزيئات العضوية الأصغر(4)، التي لا تمتلك أشكالاً هندسية خطية بل أشكالاً تشابه شذرات الثلج. وينتج الضوء في قلب

---

(3) H. Sirringhaus [et al.], «High- Resolution Inkjet Printing of All - Polymer Transistor Circuits,» *Science*, vol. 290 (15 December 2000), pp. 2123-2126.

(4) Mounir Halim [et al.], «Conjugated Dendrimers for Light-Emitting Diodes: Effect of Generation,» *Advanced Materials*, vol. 11, no. 5 (1999), pp. 371-374.

هذه الجزيئات. وتتحكم أفرع ممتدة من القلب بكيفية سريان الطاقة إلى قلب الجزيئة ثم لتتسرب منه. أما الأطراف المستدقة للأفرع فتجعل الجزيئة قابلة للذوبان، ونتيجة لذلك قابلة لأن تطبع على الرقاقات والعارضات وحتى على الهواتف الخلوية، كما أظهرت ذلك شركة فيلبس مؤخراً.

وقد قام الباحثون باستخدام قاعدة مشابهة بتغليف الجسيمات النانوية لأشباه الموصلات بأصداف واقية شبه موصلة، مشكِّلين نقاط كمٍّ تنتج ألواناً أكثر نقاء من البوليمرات. وقد قام فلاديمير بيولوفيتش (Vladimir Bulovic) في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا[5]، ببناء أداة ذات طبقة فعالة تتألف من طبقة واحدة فقط من نقاط الكم لكنها مكسوّة بأشباه موصلات عضوية، وهي أداة هجينة تستخدم أفضل الخواص من كل مكون، فنقاط الكمّ التي استخدمها تنتج الألوان النقية بينما تزوده العضويات بالإلكترونات بصورة كفوءة.

وما أن ينتج اللون المطلوب فيجب تحويل الطاقة الكهربائية بكفاءة إلى ضوء مرئي. وتقيس كفاءة الكم الخارجي عدد الفوتونات المنبعثة من الأداة لكل إلكترون يدخل فيها. والمهم هو الكفاءة الأساسية للمادة ذاتها في عملية تحويل الكهرباء إلى ضوء، أي فعالية الأداة في إيصال الإثارة الكهربائية في الطبقة المنتجة للضوء والسهولة التي يمكن بها للضوء المنتج داخل الأداة من الانطلاق خارجاً. إن الاختيار الاستراتيجي لطبقات المواد يساعد في إيصال الإلكترونات في الطبقة الفعالة وابقائها هناك. ومن خلال الاستخدام الأمثل لكل

---

(5) Seth Coe [et al.], «Electron-Luminescence from Single Monalyers of Nanocrytstals in Molecular Organic Devices,» *Nature*, vol. 420 (December 2002), pp. 800-803.

هذه الخواص، توصل الباحثون إلى كفاءات خارجية للكم كافية لتيسير استخدامات في العرض والإنارة.

والشيء الأساسي أيضاً هو عمر الأداة، فالعضويات الإلكترونية حتى الآن تحتاج إلى الوقاية لمنع دخول الأوكسيجين والرطوبة إليها، ويجب أن يُحكَم إغلاقها لكي تؤدي عملها بطريقة موثوقة وكفوءة. ورغم هذه الاحتياطات تبقى ثباتية بعض المواد الباعثة للضوء موضعَ شك، ويجب تحسينها بالنسبة لعدد من الاستخدامات. ويمكن لأفضل أنواع البوليمرات باعثة الضوء أن تستمر بعملها لمدة 40000 ساعة، وهي فترة تتجاوز الفترة المطلوبة الاستفادة منها في العديد من الاستخدامات الاستهلاكية. ولا تتمتع كل الألوان حتى الآن بهذا العمر، فعمر المواد التي ينبعث منها اللون الأزرق لازالت بحاجة للتحسين.

وشاشات العرض من اللدائن دخلت عالم التجارة واقعياً، حيث وجدت طريقها في البدء في استخدامات يكون الوزن البسيط والكلفة الواطئة ذات أهمية فيها، فشركة كوداك تنتج اليوم آلة تصوير رقمية فيها شاشة للرؤية قطر 5 سنتيمترات من اللدائن الإلكترونية. أما فيلبس فتبيع آلة حلاقة تظهر شحنة البطارية باستخدام عارضة عضوية، فالجزيئات العضوية والبوليمرية تعمل كنقاط ضوئية في العارضة كما الإلكترونيات التي تزودها بالقوة مصنوعة من اللدائن أيضاً.

وتبرز مفاهيم أيضاً تستفيد من الخواص التي تميز العارضات اللدائنية من البدائل التكنولوجية الموجودة، مثل عارضات البلورة السائلة المستخدمة في أجهزة حاسوبنا النقالة.

وتنتج فيلبس «مرآة سحرية» مدمجة في أجهزة الهاتف النقال،

فالجزء الخارجي من الهاتف ليس إلا مرآة للاستخدام الشخصي، لكن المكالمات الواردة تعرض على المرآة أيضاً.

الشبكية الصناعية

إن شاشات العرض المرنة التي يمكن حملها وارتداؤها هي مثال مثير جديد لأوجه الالتقاء بين الإنسان والحاسوب. لكننا نستطيع أن نتجاوز ذلك: لماذا لا نلغي الوسيط ونذهب مباشرة من فكرة الصورة إلى اداركنا الحسي لها؟ يمكننا استخدام السعة الوفيرة لعصبنا البصري لنقل المعلومات إلى الدماغ متجاوزين المستقبلات الضوئية وملتقين بصورة وثيقة مع اشاراتنا الذاتية الكهربائية.

إن نظرنا هو الآن متعدد الألوان وحساس وشديد التمييز بدرجة تجعل محاولة التنافس مع قابليتنا الذاتية لأول وهلة شديدة الصعوبة.

لكن الباحثين في جامعة جنوب كاليفورنيا في لوس أنجلوس حاولوا بدل ذلك إجراء أول تجربة من هذا النوع على مرضى كفيفين لم تعد مستقبِلاتهم الضوئية تعمل.

إن القضبان والمخاريط التي تحول الضوء في الأشخاص الأصحاء إلى إشارات كهربائية لنقلها بعد ذلك من خلال العصب البصري إلى مناطق الإدراك الحسي والدماغ فقدت لدى هؤلاء الأشخاص فعاليتها. إن انحلال الشبكية (Rinitis Pigmentosa) يصيب ملايين البشر أو واحد من كل أربعة آلاف شخص. والعديد منهم عميان بنظر القانون عندما يبلغون الأربعين. ويعاني عدد أكبر من الناس من تردّي البصر بسبب البقع، وهو السبب الأول لفقدان البصر في العالم الغربي ويرتبط بالعمر.

وتتوقف في حالة هذه الأمراض المتحسسات الضوئية ذاتها ـ

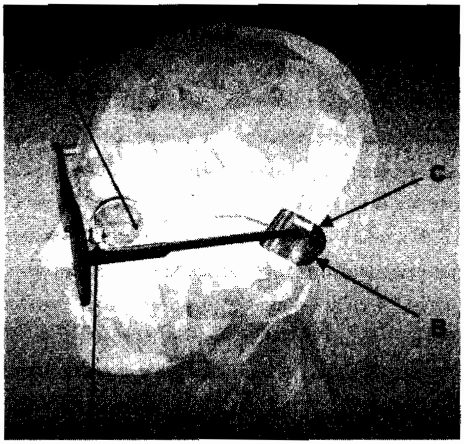
وهي التي تحول طاقة الضوء إلى موجات كهربائية ـ عن العمل ويصبح هؤلاء الذين يعانون ذلك كفيفين. لكن مسالك نقل الإشارات من الشبكية إلى الدماغ لاتزال سلمية، إذ إن 70 إلى 90 في المئة من بنية العصب التي مهمتها استلام المدخولات تبقى سليمة وفعالة. وقد قام الباحثون بتحفيز هذه الخلايا العصبية في المرضى العميان مولدين لديهم إحساساً بإيماضات ساطعة، وهذا ما يبين أن العصب البصري بقي فعالاً في هؤلاء الأشخاص الكفيفين حتى عندما توقفت محولات الضياء ـ إلى ـ كهرباء عن العمل.

لذا بدأ مارك هومايون[(6)] (Mark Humayun) وزملاؤه في جامعة جنوب كاليفورنيا بتنفيذ جراحة ترقيعية للشبكية، وهي نظام سيشمل آلة تصوير لاستلام الشكل ونظام تحفيز للشبكية يستخدم نبضات كهربائية.

وبدأ الفريق عمله بإقامة وجه التقاء كهربائي مباشر مع العصب البصري، وكانت رقاقاتهم تنظيمية من ستة عشر قطباً تم زرعها جراحياً بوضعها على الشبكية.

وقاموا بوضع إلكترونيات إضافية خارج العين لتوليد النبضات التي ستحفز تنظيمة الأقطاب. واستخدمت آلة تصوير منفصلة لاستلام الأشكال وإيصالها عبر وصلة ارتباط لاسلكية إلى الإلكترونيات التي تحفز الجزء المزدرع. وتبين الصورة أدناه هذا النظام.

(6) Mark S. Humayun [et al.], «Visual Perception in a Blind Subject with a Chronic Microelectronic Retinal Prosthesis,» *Vision Research*, vol. 43 (2003), pp. 2573-2581.



نظام الشبكية الاصطناعي الذي ابتدعه مارك همايون
A. آلة تصوير مدمجة في إطار النظارة
B. مرسل لاسلكي
C. مستلم للإشارات من آلة التصوير
D. نسق من الأقطاب مزروعة على سطح الشبكية

وتألف الجزء الخارجي من آلة تصوير صغيرة يتم ارتداؤها بواسطة نظارات لاقتناص المنظر أمام المستخدم. واتصلت آلة التصوير بحاسوب يرتديه المستخدم في حزامه ويقوم بمعالجة الإشارات ويحول الإيماءات البصرية التي يتم قياسها إلى محفزات كهربائية ترسل إلى المزدرع في الشبكية. وتم إدخال الإشارات إلى تنظيمة الأقطاب لتحفيز الشبكية من خلال سلسلة من الأسلاك قطعت جدار العين. وتم تشبيك النظام باستخدام اتصالات لاسلكية.

وتركزت تقارير الباحثين الأولى على تقدم واحد من المرضى، وهو رجل جاءهم يشكو انعدام أي إحساس في عينه اليمنى وإحساساً ضئيلاً في عينه اليسرى فقط. كان هذا الرجل المصاب بانحلال الشبكية أعمى منذ خمسين عاماً. ووجد الفريق أولاً مستوى التيار في كل من الأقطاب الستة عشر الذي سبب إحساساً بصرياً متساوياً لدى الرجل. واختلف مستوى هذه العتبات (Threshold) للأقطاب المختلفة بافتراض أن كلاً منها لامس عصيبات الشبكية بكفاءة مختلفة. وبحثت المجموعة عن شكل الحافز ـ أي شكل التيار مقابل الوقت ـ الذي أدى بالشخص إلى الإحساس باستجابة بصرية قوية. وقاموا دوماً

بالإبقاء على التيار دون حد للسلامة على المدى الطويل حدد مسبقاً.

قاموا بعد ذلك بالعمل مع المريض لدراسة استجاباته لمحفزات مختلفة. هل سيرى أي شيء على الإطلاق؟ هل سيشاهد الألوان؟ هل من الممكن أنه سيرى أشكالاً؟ أو هل من الممكن أن تحفز الأقطاب دونما قصد عصيبات أخرى تحت نقاط التماس مما يؤدي إلى ادراك حسي مخطوء للمكان؟ وعندما أرسل الباحثون نبضة من تيار خلال أحد الأقطاب أحس المريض ببقعة مدورة من الضياء بألوان صفراء أو بيضاء وبلون أحمر ـ برتقالي في بعض المناسبات. وكان في بعض الأحيان يرى اللون الأزرق عندما يطفأ المحفز. وأحس الرجل بالبقع كأنها بحجم قطعة نقد فئة ربع دولار ممسكة بيد محدودة واتفق إحساسه للموقع مع موضع القطب المحفز.

واستطاع التمييز بين التحفيزات القادمة من أقطاب مختلفة بما في ذلك أقطاب متجاورة لا يبعد واحدها عن الآخر إلا مليمتراً واحداً. واستطاع تمييز وجود الضوء المكتنف وكذلك حركة الأشياء. واستطاع هذا الشخص الذي كان أعمى للجزء الأكبر من حياته تمييز الحرف (E) من مسافة خمسة أقدام. واستطاع مع التمرين والممارسة من استخدام آلة تصوير لمساعدة إبصاره.

ويحاول هومايون حالياً تمكين شخص أعمى من القراءة وأداء المهمات البيتية الأساسية مدعماً بالمزدرع في شبكيته. وسيقوم هومايون بإنتاج تنظيمة ذات عدد أكبر من الأقطاب مزدحمة ومتقاربة لأن تجاربه الأولى أشارت إلى أنهم لم يبدأوا بالوصول إلى محددات التمييز في نقاط تماس الأقطاب مع الخلايا العصبية.

ويهدف برنامجهم إلى استخدام ألف قطب مقارنة بمليون ملتقط ضوئي لدينا، وهو ليس بالعدد الكافي لقيادة سيارة لكنه كاف إذا ما كان مؤثراً لتمييز الوجوه.

مكاملة تفاعلات الإنسان ـ الآلة ـ الإنسان

يقوم التقنيون النانويون بإغناء الروابط بين الكائنات البشرية وعالم تكنولوجيا المعلومات، إذ إن اكتشافاتهم لديها إمكانية تعزيز التفاعلات التي لدينا مع البيئة ومع أحدنا الآخر. وليست العارضات المرنة والأنوف فائقة الحساسية والشبكيات الاصطناعية إلا ثلاثة من أمثلة هذا التقدم. والجلد الإلكتروني الذي قام تاكو سومايا (Takoo Somaya) وفريقه في جامعة طوكيو بابتداعه ليس إلا مثالاً آخر وهو صفيحة مرنة من اللدائن تعطي الروبوت إحساساً باللمس، فالضغط المسلط على قفاز الروبوت الصناعي يؤثر على التيار الذي يسري عبر الجلد ويستخدم هذا التيار لتمثيل الإحساس باللمس.

والبشر على أي حالة هم أكثر من كواشف حساسة للضوء والرائحة والصوت والملمس، فنحن أيضاً مدركين حدسيين ومحنكين للمعلومات التي تتكامل من خلال حواسنا. ونحن نعتمد على وحدة معالجة مركزية شبكية كثيفة الارتباط متصفة بالديناميكية، ألا وهي الدماغ البشري الذي يوحد إحساساتنا.

ويعمل الباحثون على التفهم العميق لكيفية قيامنا بتوحيد إحساساتنا، أي على سبيل المثال كيف يزيد التعاون بين الرؤية والسمع من قدرتنا على الاستيعاب والتفهم أبعد بكثير عما يتيحه أيٌّ من الأحاسيس لوحده.

ويتطلب الأمر في الوقت ذاته دمجاً شبكياً للمكونات التي تؤلف هذه الأنظمة المتكاملة. وتستخدم ذات الفكرة لشبكات من الجسيمات تشكل حسب الطلب كما وصفت في الفصل (الحماية) لدمج ما يتم تحسسه من قبل تنظيمة دائمة التغير لآلاف أو ملايين من الأدوات. وستقوم شبكات مساحة ـ الجسم في المستقبل بحصاد مليارات

البيتات (Bits) من المعطيات كل ثانية. وسيقوم الإنذار المبكر للخثر الدموية المتشكلة والمنحلة، مما يمكن أن تؤدي إلى سكتة بإطلاق عوامل تخفيف لزوجة الدم. وسأقوم بربط قناة معلوماتي السمعية أو الشمية إلى قناتك وسأشير إلى صوت أو رائحة تستحق الانتباه. وستنزلق آخر الأنباء على السطح غير المستغل من مجال نظري متيحة لي قراءة الأخبار من غير جريدة، أو حتى جريدة إلكترونية. إنها إشارة مباشرة إلى دماغي تصف الشكل الذي كانت ستضعه فيما لو كنا لانزال نعيش في مثل هذا العالم المادي الصلب.

الفصل التاسع

الإيـصـال

تسير كل مكالمة هاتفية بعيدة المدى تنفذها اليوم عبر الألياف البصرية، وهي أسلاك من الزجاج بقطر الشعرة ينطلق الضوء عبرها بسرعة تبلغ مليارات الأميال في الساعة. وهذا الزجاج منقى من الشوائب التي تمتص الضوء، وهي الذرات الإضافية التي تضاف لتلوين الزجاج ذي الصبغة، بدرجة تحافظ على قوة الضوء عندما ينطلق في هذا النفق ذي القطر المايكرومتري والطول الذي يبلغ آلاف الأميال. وتحافظ الإشارات الحاملة للمعلومات على شكلها وتتابعها حتى بعد الرحلة الطويلة: عشرة مليارات من أوراق اللعب ترمى في الهواء وتعود إلى الأرض بنفس الترتيب وغير مختلطة، ويحمل كل خيط زجاجي في أنظمة الاتصالات المستخدمة اليوم مليون مكالمة هاتفية في نفس الوقت. وفي الوقت ذاته تم صنع أنظمة ألياف زجاجية في المختبر اليوم تستطيع نقل مئة مليون مكالمة. ولا يتطلب الأمر سوى أن يكون الجزء الداخلي للخيط الزجاجي، وبقطر لا يتعدى 20 مايكروميتر، نقياً بشوائب لا تتجاوز أجزاء بالمليار، وذا استدارة متكاملة لا تشذ عن حد النانومتر. ويقوم هذا القلب بنقل الضوء من دون أي تشوه إلى نهاية مساره ولا يمكن تحمل أي

احتكاك أو خشونة للقلب مع المادة المحيطة لكي لا يزلق الضوء عن مساره المقصود.

والألياف الزجاجية حيوانات اجتماعية، فالألياف المفردة لا توجد بتاتاً في المنظومة. ويمثل حفر الخندق الذي ستدفن فيه الألياف واستحصال حقوق الطرق بجوار السكك الحديدية وتركيب الألياف بأمان في الأرض، جزءاً مهماً من كلفة تنصيب النظام. إن النسبة المئوية لزيادة الكلفة في حال وضع مئات الألياف لن تكون أكثر من كلفة وضع ليفة واحدة إلا قليلاً، لذا لا نقوم بعد الآن بقياس سعة الألياف الضوئية بعدد المكالمات التي تنقلها ليفة واحدة، إذ إن ذلك يفقد أي دلالة، لأن هذه الليفة تقدر أن تنقل مجمل المكالمات في أمريكا الشمالية وتستطيع حزمة متواضعة نقل مكالمات العالم كافةً.

إن الاتصالات بعيدة المدى بالألياف قد قُهِرت وقتياً بنجاحها وهي تكافح منذ سنة 2000، فالألياف تتبارى مع ذاتها فقط في الاتصالات بعيدة المدى وبنجاح باهر: والمكالمات المكلفة 3 سنتات عبر القادة هي البرهان على ذلك.

والحاجة إلى سعة اتصالات الإنترنت ليست محدودة بنفس الطريقة التي تحدد بها الحاجة للمكالمات الهاتفية، فنحن لا نستطيع أكثر من المساهمة في مكالمة تلفونية واحدة في أي وقت، لذلك فإن حاجة العالم للاتصالات الصوتية محددة بصورة كبيرة. وقد يكون هنالك حد أعلى لمقدار السعة التي ستتطلبها الإنترنت في النهاية، وهو ما سوف لن نعرفه إلا بعد مرور قرن من الزمن، لكن ما يمكننا التأكد منه هو أنها ستفوق بآلاف المرات متطلبات الاتصالات الهاتفية. إن توصيف فصل نموذجي في الإنترنت أصعب من توصيف مكالمة هاتفية ـ إنه مثل محاولة توصيف نموذج الشخص: إنه يميل إلى أن يكون بطول 170 سنتمتراً ويكون وزنه نحو 65 كيلوغراماً لكنه

يستطيع حمل من واحد إلى خمسمائة كيلوغرام من واحد إلى تسعة أقدام ارتفاعاً. والناس على الغالب لطفاء لكن يمكن أن يكونوا في بعض الحالات حقراء، ويمكن أن يكونوا في حالات شفوقين إنما ليسوا ودودين، وفي حالات أخرى ودودين إنما لا يتمتعون بالشفقة. وتتضمن فصول الإنترنت وابلاً من قطع صغيرة من البريد الإلكتروني: قد تكون طلقات بندقية هوائية من الرسائل القصيرة أو أنها دفقة لمكالمة هاتفية على الإنترنت أو رذاذ مؤتمر فيديوي رديء النوعية أو صلية من رشاش مؤتمر فيديوي سامي النوعية أو نار مدفع هاون لنقل الملفات العرضي. وقد نرغب في المستقبل أن تقوم الإنترنت بنقل تجربة كاملة للتفاعل للواقع الافتراضي: فيديو مجسم ثلاثي الأبعاد، وصوت متعدد المصادر، وإعادة اصطناع التجربة الحسية، التي لن تكون محدودة بالصورة والصوت، بل ستشمل الملموس وما يمكن تحسس رائحته. وهكذا ستدوم الجلسة النموذجية بالإنترنت ما بين جزء من النانو من الثانية وبين الأبدية، وستنقل بيتات تتروح بين العشرات وما لا نهاية له، وستنفذ ذلك بسرعات تتباين بين بضع بيتات إلى تريليونات البيتات بالثانية، وستتطلب مستوى من الأمان يترواح بين الصفر وبين ذلك الذي تبغيه وكالة الاستخبارات المركزية.

الاتصال باستخدام الضوء

سعى الباحثون في إنجلترا والولايات المتحدة خلال السبعينيات لإتقان إنتاج زجاج نقي لكي يصنعوا أنبوباً من الضياء تتدفق فيه القوة الضوئية عبر أطول مسافة ممكنة. وبدأوا بالبحث عن طرق جديدة لإزالة الشوائب ـ وهي ذرات غير ذرات السيليكون والأوكسيجين الأساسية في الزجاج النقي ـ إلى ما دون أجزاء بالمليار. ووجد الباحثون الطرق لسحب هذا الزجاج في درجات حرارية عالية بشكل

ألياف طويلة متواصلة. وكان المطلوب من هذه الألياف أن تكون بأعلى درجة من الصقل لتشكل شارعاً جيد الرصف لترشد الضوء في مساره.

والصقل شيء نسبي يحكم عليه من خلال مقارنته بما يجب أن يمر على ذلك السطح، فالطريق يجب أن يكون صقيلاً بالنسبة لحجم الإطار، والمطبات تشعر بها في السرعة، أما الحصى الناعم فلا تشعر به.

وبطريقة مشابهة، ولكون موجات الضوء ذات طول موجي مايكرومتري، استوجب الأمر ان تكون الألياف الزجاجية صقيلة إلى حد النانومتر. وحملت الألياف المرشدة للضوء الإشارات الضوئية في الثمانينيات لمئات الأميال مع فقدان مقبول للقوة. وكان هذا الزجاج نقياً بدرجة تجعله ناقلاً بصورة مثالية حتى لو كان سمكه أكثر من نصف ميل مقارنة بزجاج نوافذ الطيارة البالغ سمكها إنشاً واحداً فقط. إن نقاء اللون في الضوء المتنقل في الليف الضوئي ذو أهمية حاسمة أيضاً.

والضوء النقي هو على النقيض للضوء الأبيض الذي هو مزيج من كافة الألوان.

إن أغمق درجات اللون الأزرق أو الأخضر أو الأحمر يمكن أن تكون نقية: مثل الصوت الذي تعطيه آلة كمان جيدة التنغيم، فهو موجة أحادية التردد تتذبذب في الزمان والمكان. والضوء يسير بسرعات مختلفة في الألياف الزجاجية اعتماداً على لونه. إن هذه الظاهرة التي تعرف بالتشتت (Dispersion) هي أساس عمل المنشور والتي تسبب تكون قوس قزح الذي يفصل ألوان الطيف الشمسي في اتجاهات مختلفة. وفي نظام الاتصالات بالألياف الزجاجية إذا ما قمنا

بإرسال معلومات مكونة من مزيج من الألوان الزرقاء والخضراء والحمراء على قناة، فإنها ستنتشر عند وصولها. وما بدأ كرزمة من المعلومات محددة بوضوح ستتحول إلى كتلة سائلة من البيتات غير القابلة للتمييز بنفس الطريقة التي تميع فيها قطع صغيرة باردة صلبة من الزبدة في مقلاة وتفقد هويتها المنفصلة.

إن استخدام اللايزرات، وهي مولدات لأنقى أنواع الضوء التي يمكن تصورها، يقلل من تأثير التشتت. وكانت اللايزرات التي اخترعت في أوائل الستينيات تُصنع أولاً من الياقوت الذي تزوَّد بالطاقة باستخدام ضوء من مصباح شديد التوهج لتعطي لوناً أحمر قانياً نقياً. وأدت اختراعات تالية في روسيا وأمريكا إلى لايزرات مصنوعة من أشباه موصلات نقية ومثالية وتزود بالقوة بحقنها مباشرة بالتيار الكهربائي. ويعتمد اللايزر على ظاهرتين: الكسب (Gain) والتغذية المرتجعة (Feedback)، فشدة الضوء يجب تضخيمها ضمن اللايزر (الكسب) ويجب أن تعكس راجعة إلى ذاتها عندما تصل نهايات وسطها التضخيمي (التغذية المرتجعة). ويمكن بذلك للضوء النقي أن يُستَحث للتزايد داخل تجويف اللايزر ليطلَق بعد ذلك بتحكّم.

لقد عانينا كلنا من مؤامرة الكسب والتغذية المرتجعة في الصرخة ذات الطبقة الصوتية العالية التي تنطلق عندما يقف شخص يستخدم مايكروفوناً أمام منظومة تفخيم الصوت التي يستخدمها. وهناك حاجة لقدر قليل من الصوت فقط لبدء دورة الكسب ـ التغذية المرتجعة في طريقها: والصوت يلتقطه المايكروفون ويضخمه (الكسب) عندما يدخل في مكبر الصوت. ويعاد التقاط الإشارة هي أعلى من قبل المايكروفون (تغذية مرتجعة) وتكرر الدورة نفسها نامية في شدتها. ولولا الحدود على القوة التي يمكن أن يعطيها مكبر

الصوت، فإن الدورة ستستمر حتى ينخلع الجلد بواسطة موجات الصوت: والحقيقة أن مكبرات الصوت لها حدود تمكنها من العصف بذلك العلو فقط، وذلك ما يخرش أذنينا لكنهما في النهاية تسلمان. والصوت الناتج يميل إلى أن يكون نقي النغمة، حتى إذا ما كانت الهمهمة التي ولدته خليطاً متعدد الألوان. وكيف يعرف مكبر الصوت الدرجة الصوتية التي يجب أن يصرخ بها؟ إن أي تردد يتحمل أكبر قدر من الكسب والتغذية المرتجعة سيرن أولاً. إن نفس الاختيار الانتقائي للنغمة الأكثر تفضيلاً هي السبب للنقاء الطيفي للايزر. ويبذل مصممو اللايزر جهوداً خاصة لتوكيد أن لوناً واحداً محدداً بوضوح يضخم بقوة وتعاد تغذيته بما يزيد من نقاء الضوء الناتج.

وتولد اللايزرات اليوم ضياء أزرق نقياً أو أحمر نقياً أو ما تحت الأحمر النقي. والأشعة التي تنتجها مركزة بتلك الدرجة بحيث إنها تحفر المادة وتنسف ثقوباً ميكروية في قرنية العين أو الصلب أو جلد الإنسان. وتخترق الأشعة تحت الحمراء التي تنطلق في الفضاء الضباب مرسلة معلومات خلال أميال مما يبدو لأعيننا غموضاً قاتماً. وتساعد اللايزرات في قياس المسافة التي تفصل التوابع الأرضية على بعد آلاف الأميال إلى ما هو ضمن حدود دقة تبلغ الإنش أو أحسن من ذلك.

وهذه الألوان النقية المستمرة من وجهة النظر الاتصالات ليست إلا البداية، وهي لوحدها لا تحوي أي معلومات، فالضوء غير المضمن ليس إلا وعاء شحن فارغاً، إذ إن المعلومات تكمن في قابلية التغيير. علينا أن نغير شيئاً ما عن الضوء (شدته، ألوانه، وقت وصوله) لكي تنقل المعلومات أو لنجيب عن سؤال. لذا، فإن منظومات الألياف الضوئية تضمن بريق الضوء، فهي تشغّل وتطفئ مصدراً ضوئياً لنقل إشارة واحد أو صفر، أي نعم أو لا. إن إطفاء

الضوء تماماً كما في هذا المصدر له ثمنه، إذ إنه يستغرق وقتاً ليشتعل ثانية، وتسبب برودة الشعيرة المولدة للضوء تبدل لونها.

إن الزحف اللوني سيغير سرعة الضوء، ما ينتج وصول خليط من البيات مثل إرسال الصفحة الأولى من رسالة بالبريد وإرسال الصفحة الثانية بالفاكس.

لذا، فإن تضمين اللايزرات بحيث لا تنطفئ كلياً بل تعتم فقط هو الأسلوب الأفضل لتأمين قيام أشعتها بنقل المعلومات بوضوح.

نستطيع تقليل التبدل في لون الضوء من لايزر مضمن بدرجة إضافية من خلال فصل إنتاج الضوء عن بصم المعلومات. وقد قام باحثو الألياف الضوئية بابتداع مضمنات ضوئية منفصلة عن اللايزرات مهمتها الوحيدة هي نقل أو حجب الضوء انتقائياً باصمةً بيتات على القناة. وتستطيع هذه المضمنات اليوم وضع بت (Bit) جديدة من المعلومات على الضوء مرة كل خمسة وعشرين تريليون جزء من الثانية.

وكان الضوء في الألياف يتطلب حتى فترة متأخرة، أي في التسعينيات، أن ينظف كل بضعة مئات من الأميال من خلال عملية مضنية، فالإشارات تكون قد فقدت قوتها لكن شكلها يبقى سليماً على الغالب فيما إذا كانت آثار التشتت قد أحسنت إدراتها. وكل المطلوب كان تضخيم الإشارة كما في نظام ستيريو، أي زيادة قوتها مع المحافظة على شكلها. ومع ذلك فقد كان من الأسهل آنذاك قياس الإشارة الضوئية وحزمها بصورة وجيزة في كتلة من الإلكترونات ـ أحسن التخمينات فيما إذا صفر أو واحد قد أُرسل ـ ثم إعادتها إلى ضوء، فبدل استخدام ماكنة استنساخ لتكبير الشكل كنا نقوم بإعادة رسمه، ثم جاءت المضخمات الضوئية، وهي مصنوعة

مباشرة من الأليـاف الضـوئيـة وقامت بتغيير طريقه عمـل الآلـيـاف الضـوئية. واستخدمت هذه المضخمات حقيقة أن الذرات المزودة بالطاقة من عنصر الأيربيوم (Erbium)، وهو شخصية نادرة الاستخدام في الجدول الدوري وذو رقم ذري عال، ترفع طاقة الضوء.

لقد استقرت الألياف الضوئية على لون خاص دون الأحمر لا يفقد إلا القليل من قوته ويعاني الحد الأدنى من الانتشار بسبب ظاهرة التشتت. تضخِّم ذرات الإيربيوم المشربة بالزجاج هذا اللونَ على وجه الدقة، وتساعد الضوء على اكتساب القوة عبر مساره كالطائرة التي تعتمد على نقل الوقود وهي في الجو.

قلل هذا الحل الرائع من كلفة إرسال المعلومات على شبكات الألياف الضوئية بدرجة إضافية. لكن المدى الكامل لألوان الطيف الضوئي لازال لا يستغل منه إلا القليل حتى هذا اليوم. إن التردد الذي تتذبذب به موجات الضوء عال، ويبلغ مئات تريليونات الذبذبات في الثانية مقارنة مع بضع مئات على الغيتار والملايين المتواضعة من راديو FM والمليارات الزهيدة من الهاتف الخلوي. ويتواجد بسبب تذبذب موجات الضوء بترددات عالية مدى واسع من القنوات يمكن الاختيار فيما بينها وتستطيع كل منها نقل الكثير من المعلومات. ويمكن استيعاب المئات من هذه القنوات وكل منها تتمتع بالحد الأدنى من الفقر والتشتت.

وتعرف تقنية جمع العديد من القنوات الضوئية على خيط ليفي زجاجي واحد بتصميم قسمة الطول الموجي - (Wavelength Division Multpexing)، وأفادت هذه التقنية بمزج قابلية أربعين إلى ثمانين ليفة زجاجية منفصلة على ليفة واحدة. وكان المهندسون قبل اكتشاف المضخمات الضوئية قد بنوا منظومات تعترض سير الضوء عبر الليفة كل بضعة مئات من الأميال. وتقوم هذه المنظومات بتجزئة

محتويات الليفة إلى قنوات منفصلة وتتحسس ثم تقوم بإعادة إرسال كل واحدة وتجمع الألوان المختلفة على ليفة واحدة. لكن المضخمات الضوئية غيرت كل هذا، متيحة تضخيم ثمانين قناة حاملة للمعلومات أو نحو ذلك في آن واحد وضمن ليفة واحدة. وكانت النتيجة تضخيم قسمة طول موجي اقتصادية وعملية، أو الجمع بين عدد من التقنيات الجديدة ـ ألياف ضوئية ذات تصميم خاص ولايزرات عالية النقاء ومضمنات سريعة وجامعات ومجزئات أطوال موجية والمضخم المعتمد حصرياً على الضوء كلها ساعدت على إيجاد نظام موحد مثالي ـ ودفعت بتريليونات البتّات خلال كل ليفة في الثانية الواحدة.

تقرير حدود الاتصالات المستخدمة للضوء

قام الباحثون في مختبرات بلْ (Bell) في نيوجرسي سنة 2000 بتحديد أحد الحدود الأساسية على كمية المعلومات التي تتمكن الألياف الضوئية من نقلها. واعتمد العمل على نظرية المعلومات، وهي عمل رياضي يصف الكفاءة القصوى للاتصالات.

وتقاس الكفاءة بعدد البتّات من المعلومات المنقولة في كل دورة، وتعتبر كفاءة تبلغ الواحد ممتازةً، وتعني بتّة واحدة من المعلومات تبصم على الموجة عبر فترة ذبذبة واحدة. ويمكن للمرء أن يحرز ما هو أحسن أو أسوأ من هذا اعتماداً على صفاء القناة. وتعتبر القناة مشوشة إذا ما حجبت التموجات التفسير الصحيح لمعنى ما أرسل. والحالة شبيهة بالمحادثة، فإذا ما كانت الظروف المحيطة هادئة سنستطيع تفهم كمّ أكبر بكثير، وحتى ما يقوله المتكلم السريع الهادئ.

وقد طور منظرو الاتصالات تشكيلة من التقنيات تسماح بإرسال

الحد الأقصى من المعلومات عبر القنوات المشوشة التي هي واقع.

ولا يقتصر ذلك على إرسال 0 و1، بل الاختيار بدل ذلك من بين 0 و1 و2 و3 خلال فترة كل رمز، وهو أمر يمكِّن نظرياً من استغلال إمكانية القناة أكثر من بت واحد لكل دورة موجية في الثانية. إن الإرسال باستخدام الإضافة (Redundancy) ـ هو أبسط أسلوب أي قول الشيء ثلاث مرات وأخذ رأي الأكثرية ـ يمكن أن يقلل الأخطاء في بيئة مشوشة.

وقد تحرى بارثا ميترا (Partha Mitra) وجايسون ستارك[1] (Jason Stark) من مختبرات بلْ الحدود النظرية للمعلومات على الليف البصري، وأقرّا بأن أول عارض يحدد القابلية هو تأثير يُعرف بـ «تضمين تقاطع الأطوار» (Cross Phase Modulation)، فلكي يملؤوا الألياف بأكبر قدر ممكن من المعلومات، يريد مهندسو الأنظمة الضوئية أن يحشروا قدر ما يتمكنون من القنوات الحاملة للمعلومات المتوازنة على ليفة واحدة. وطالما كان الضوء يسير مستقلاً على كل قناة. وتحتل كل قناة جزءاً منفصلاً من الطيف الضوئي، فسيكون بالإمكان فصل الإشارات المحمولة عبر كل قناة واسترجاع معلوماتها في النهاية الثانية.

إن استقلالية الألوان ـ افتقادها التأثير على بعضها البعض ـ هي خاصية أساسية للضوء: وفوتونان يتقاطع مساراهما في الفضاء الخارجي ـ ضوء كامل ومجرد من كل انواع المادة ـ لن يؤثر أحدهما

---

(1) Partha P. Mitra and Jason B. Stark, «Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fibre Communication,» *Nature*, vol. 411 (28 June 2001), pp. 1027-1030.

على خط انطلاق الآخر، ولن يعرفا حتى بوجود أحدهما الآخر.

والألياف الزجاجية تختلف بالطبع عن الفضاء الخارجي، فهي مملوءة بصورة محكمة بذرات السيليكون والأوكسيجين. ورغم ذلك، وعند عدم كون الضوء بتلك الدرجة من البريق، فإن الفوتونات تشير أساساً بصورة مستقلة واحدها عن الآخر على امتداد الليف البصري. أما في قوى ضوئية أعلى، فإن موجة ضوئية واحدة تدفع وتجر الإلكترونات المطمورة في الزجاج بينما تشعر موجة ثانية تسير بإزائها تأثير هذه التذبذبات. وهكذا، فإن الضوء في إحدى القنوات يؤثر على الفوتونات الأخرى. ومع إضافة قنوات أخرى وقوة أخرى يتعاظم هذا التأثير. وفي النهاية تترك كل قناة طبعات أصابع تزداد تشويهاً من نموذجها من البتّات على محتويات القناة الأخرى.

وقد بين ميترا وستارك في المختبر أنه حتى مع وجود هذا التأثير المزعج المعتمد على الكثافة، ففي الإمكان إرسال ثلاث بتات من المعلومات خلال كل دورة من ذبذبات الموجة الضوئية. وقد نجح المهندسون حقلياً على سبيل المقارنة في إرسال ما يقارب نصف بتة واحدة في كل دورة. وهكذا لم نقم حتى الآن بالاندفاع نحو الحدود الأساسية، إذ إننا لازلنا في السدس الأول من الطريق.

لكن حتى نتائج ميترا وستارك كان فيها بعض التشاؤم البراغماتي، فالتفاعل البيني للقنوات والبصمات المتبادلة ليست سيئة بدرجة التشويش العشوائي. ولما كنا نعرف كيف تتفاعل الفوتونات فيما بينها عندما تنطلق في ليفة زجاجية فسنستطيع مبدئياً تقدير ما يجب أن يكون قد أرسل وذلك من الخليط الذي تم استلامه، فبندقية تفوح منها رائحة الدخان وبصمات أصابع وجثة قد لا تبرهن بطريقة لا تقبل الطعن على حدوث جريمة، لكنها إذا اقترنت بالنزعة الطبيعية والسرد فقد توحي من دون أي شك بوجود الجريمة. ويستنتج

مهندسو الاتصالات بصورة منتظمة ما الذي أرسل اعتماداً على الإشارات المشوهة التي تستلم مستخدمين معرفتهم الوثيقة لقناة الاتصال التي أرسلت الإشارة عليها.

ويقوم كل منا روتينياً بنفس النوع من العمل الذي يقوم به هؤلاء الباحثون.

ورؤيتنا للموناليزا في متحف اللوفر تحجب بالانعكاسات من أحد عشر لوحاً زجاجياً مقاوماً للرصاص يرتد منها الضوء القادم من الأنوار الساطعة لآلات التصوير غير المسموح بها.

إننا نرى الموناليزا ومصابيح آلات التصوير وقمصان الشباب والشابات بعناوينها المرحة متداخلة مع بعضها. وتقوم في أذهاننا وببرهة قصيرة بطرح التشويهات، ونرى العمل الفني، ويعود ذلك جزئياً لامتلاكنا توقعات محددة لما سنقوم برؤيته. وسنحل لحظوياً مسألة انعكاس معقدة.

إن النتيجة التي استحصلها ميترا وستارك مفيدة كمرشد، وإذا ما تم تطوير تقنيات إضافية مثل ـ التشفير متعدد المستويات (Multilevel Coding) وتضمين الطور (Phase Modulation) ـ فسيمكن زيادة إمكانية نقل المعلومات لشبكات الألياف الضوئية الحالية بعامل يبلغ عشرة أضعاف، مما يعني التشبيع عندما نقترب من 2 مليار بتّة في الثانية. إن نهاية النمو بقفزات ووثبات في إمكانيات الآلياف الضوئية باتت ضمن ناظرينا.

التشبيك بالضوء

لقد تم التقدم في منظومات الاتصالات الضوئية باستخدام كمية واحدة: سرعة المعلومات في المسافة. لكن قيمة الانترنت أصعب

جداً من أن تثبت على كمية واحدة. إنها على وجه التأكيد أكثر بكثير من ارتباط واحد ثابت فائق السعة. إن قيمتها الحقيقية تكمن في ما نستطيع أن نعمله خلال روابطها دائمة التغير مستخدمين بطريقة إبداعية مسالك بديلة إلى معلومات لم تكن قابلة للرؤية عندما تم بناء الشبكة.

إن نظام «المحور ـ والأشعة» (Hub - and - Spoke) لطرق النقل الجوي في الولايات المتحدة مثال آخر للشبكة، فليس من المجدي وجود سفرات مباشرة وارتباطات ثابتة من نقطة ومن كل مكان إلى أي مكان. إن ربط أي من الـ 100 مطار، مثل روشتر (Rochester) في مينيسوتا وشمال غرب أركنساس، وجاكسون هول وبويز إنترغالاكتيك (Boise Intergalactic) بتسعة وتسعين مدينة أخرى سيعني نحو عشرة آلاف طريق جوي. ولدى شركات الخطوط الجوية ما يكفي من المشاكل كما هي الحالة الآن.

لذا، وبدلاً عن ذلك تقوم الخطوط بالربط من خلال المحاور: شيكاغو ودالاس ولاغوارديا (مطار الطيران الداخلي في مدينة نيويورك) ومطار لوس أنجلوس، وذلك لإيصال المسافرين من أحد الأمكنة إلى المكان الآخر المقصود. وهذا يؤمن إن عدد الطرق الجوية المنفصلة المطلوبة يتقلص بدل ذلك مع عدد الأماكن. وواحدة من منافع هذه المعمارية الشبكية هي الوفرة: فهناك أكثر من طريق واحد للوصول من بوسطن إلى أورانج كاونتي: سافر خلال دالاس أو شيكاغو أو دنفر على سبيل المثال.

وأحد هذه الخيارات ـ وهو خلال دنفر ـ هو أقصر الطرق، لذا فهو المفضل. لكن إذا ما كانت طائرة بوسطن ـ دنفر، أو طائرة دنفر ـ أروانج كاونتي ممتلئة، فستكون الطرق البديلة في متناول اليد. وهناك طريقة مبنية في النظام ـ الطرق البديلة ـ للتعامل مع الفائض

عبر أي طريق محدد. هذه الوفرة لا يقتصر نفعها على التدفق، بل إنها تجعل الشبكة قادرة على تحمل الاضطرابات، فإذا ما ضربت عاصفة ثلجية شيكاغو فلاتزال هناك خيارات أخرى للسفر من بوسطن إلى سياتل.

إن هذا الأسلوب الشبكي يعزز الكفاءة من خلال تقليل عدد طرق السفر الجوية. لكنه على أية حالة يصنع عبئاً جديداً من المسؤولية يتمثل في التحويل الكفوء للركاب داخل المطارات المحورية. لكن ما يجري في المطارات عملية معقدة بصوة ملفتة للنظر مقارنة بالقوس الرشيق للطائرة النفاثة الحديثة، فالركاب يخضعون لتحول فجائي، فقد كانوا يحلقون بسرعة 880 كيلومتراً في الساعة وهي تقل بقليل عن سرعة الصوت، لكنهم في المطارات يتحولون إلى سابلة بطيئي المشي يأكلون البسكويت الضخم.

والموقف أكثر منافاة للمنطق في أنظمة اتصالات الألياف الضوئية، فالبتات تنطلق في الألياف الضوئية بسرعة الضوء، أي نحو مليون ميل في الساعة.

لكن بسبب التشغيل الإلكتروني لمطارات الإنترنت، وهي أجهزة التحويل الطرفية المعروفة باسم محددات المسالك (Routers)، تتحول الفوتونات المنطلقة بسرعة الضوء إلى إلكترونات متوانية خمس عشرة مرة على المعدل في مسارها. وتجلس هذه على مساطب غير مريحة تعرف بالحواجز الإلكترونية منتظرة الجزء التالي ذي السرعة الفائقة. وقد أصيبت مناطق الانتظار هذه بالاكتظاظ، فشبكات المعلومات تتناول بيتابتّات (Petabits)، أي آلاف تريليونات الأجزاء من المعلومات اليوم، مع ازدياد حماسنا للسفر الرقمي عبر الإنترنت. لذا، فإن الشبكات الضوئية بحاجة لحل أكثر ملائمة. وتظهر إعلانات مطار دبي العالمي القمة في التخيلات: لن يكون

هناك بعد الآن مطارات ساكنة حيث تهبط الطائرات ويجلس الركاب، بل سيكون بدل ذلك محطة رسو طائرة: ترتبط الطائرات ثم تنفصل ويتدفق الركاب خلال قلب المطار نازلين وصاعدين على سلالم متحركة إلى طائرتهم التالية. ولا من أحد يوقف التحرك بسرعة الطائرة للحصول على وسيلة نقله.

وقد بدأ الباحثون في الشبكات الضوئية باستخدام التقنية النانوية لفعل الشيء ذاته، فالفوتونات الحاملة للمعلومات سوف لا يتم بعد الآن إبطاء سرعتها إلى سرعة الإلكترونات ودفعها من دون نظام إلى بوابة المغادرة الجديدة وإبقاؤها بالانتظار للطائرة التالية ومن ثم إطلاقها في اتجاه جديد. بدل ذلك سيتم طيران الفوتونات خلال عقدة ليتم حرفها لحظوياً خلال الممر التالي في مسلكها الشبكي عبر مسارها. وفي هذه الشبكات الضوئية بكليتها ستبقى الإشارات فوتونية عبر الزمان والمكان. والغاية النهائية في التحويل الضوئي تعني دفع الضوء بالسرعة التي يتم تلقي البتات بها وهي عشرات الأجزاء من مليار من الثانية اليوم وربما أسرع من ذلك في المستقبل. ويقوم تقنيو النانو بصنع المواد والعدد التي ستعمل في واحد من التريليون من الثانية لإعادة تشكيل الاتجاه الذي يتم حرف الضياء إليه ضمن العقدة داخل الشبكة.

ارتداد الضوء خلال الإنترنت

إن جعل الضوء ينجز أكثر من مجرد نقل المعلومات عبر مسارات محددة، بل أن يقفز برشاقة إلى أي هدف، يتطلب منا تغيير اتجاهات الفوتونات بنظام تحكم استثنائي. ونحن بحاجة إلى مواد تجعل الضوء يتفاعل بشدة مع الضوء، وعلينا أن نبني من هذه أدوات تقوم فيها إشارة ضوئية بالتحكم في إشارة أخرى. ويجب أن تقوم

هذه الأدوات بتوجيه الإشارات من دون أن تسبب الكثير من الإنهاك للفوتونات، أي فقدان للقوة في الإشارة التي يصار إلى تحويلها، مثلما يجب أن يبقى مستوى سقوط الطائرات تحت عتبة محددة.

ويجب على المواد الضوئية غير الخطية أداء سحرها على مجموعة معينة من الألوان، أي تلك التي في المنصة تحت الحمراء التي ينطلق فيها الضوء متحرراً من المعوِّقات خلال الألياف الضوئية. وتتطلب الشبكات الضوئية أدوات مصممة مصنوعة من مواد تبدو فيها خواص غير متوفرة في الطبيعة: والتقنية النانوية هي المرشح المثالي لملء هذا الموقع الشاغر.

وقد تم مؤخراً تسخير كُرات باكي، وهي كرات قدم كاربونية ذات قطر يبلغ 2 نانومتر كمواد عالية الأداء للتحويل الضوئي، فقد استخدم المنظر مارك كوزيك (Mark Kuzyk) من جامعة ولاية واشنطن ميكانيكا الكم سنة 2000 لاحتساب كم يجب أن تكون قوة المادة المستخدمة لتحويل الضوء. ومع تكامل اشتقاقاته الرياضية قارن كوزيك نتائجه مع ما حصل عليه الباحثون الآخرون في المختبر ولاحظ وجود فجوة لافتة للنظر، فمن بين عشرات التقارير المنشورة في الأدبيات لم يصل أي منها إلى واحد من ثلاثين من الحد الأساسي الذي اشتقة كوزيك. كان ذلك كأن شخصاً ما مستخدِماً معرفته بفسلجة الإنسان والانسيابية الهوائية، قرر أن الآدميين يجب أن يكونوا قادرين على قطع الميل ركضاً في أربعة دقائق، لكن أياً منهم لم ينجح في قطع الميل في أقل من ساعتين. ما الذي كنا نفعله خطأ؟ إن كلفة نقص الأداء بعامل يبلغ الثلاثين كانت خطيرة: فالإشارات لا يمكن توجيهها إلا عندما كانت تنقل باستخدام شدة ضوء عالية إلى درجة غير عملية.

استخدم كوزيك نظريته ليبين كيف يمكن لكيميائي أن يبني

جزيئة بإمكانها بلوغ إمكانياتها الكامنة، وبدأ فريق من منفذي التجارب العمل لتحويل حلم كوزيك إلى حقيقة(2)، بحيث غدا واين وانك (Wayne wang) من جامعة كارلتون في أوتاوا بأونتاريو المختص بالكيمياء التركيبية منفِّذَ الحلم، أي صانع الملابس الجزيئي.

وقام باحثون في مجموعتي في جامعة تورنتو بتوفير الجهد الهندسي والتصاميم وخياطة الملابس وتجربة قياسها مسلطين نظرات فاحصة إلى أداء المادة الجديدة ومصدرين حكمهم تبعاً للأسس الهندسية العملية للتحويل الضوئي. بدأ الكيميائيون عملهم بكُرات باكي الزغبة ذات السحب الغنية بالإلكترونات، لكنهم أدركوا أن هذه الكرات بحالتها النقية سوف لا تؤدي المهمة. وقمنا مسترشدين بالأسس التي وضعها كوزيك بمزج كُرات باكي مع بوليمر، رابطين إياه إلى سطح كُرات باكي ومستخدمين هذا التحكم الجديد لإزاحة رنين كرات خارج نطاق الألوان المستخدمة في الاتصالات الضوئية. ووصلنا في النهاية، من خلال التصميم المنطقي الجزيئي والإدراك سوية عبر الكيمياء والفيزياء والهندسة ضمن عامل النصف، من الحد الكمي الأساسي. كنا كمن كان يركض الميل في أربع دقائق منذ الأزل ووجدنا فجأة أن شخصاً ما كان قد ركض الميل في ستة عشر ثانية.

اصطياد الضوء

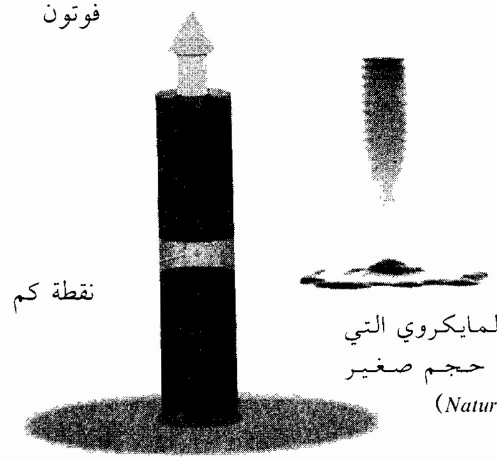
هناك بُعد إضافي مهم لصنع أدوات تقوم بتحويل الضوء باستخدام الضوء: فمن الضروري لتحويل التغيرات الدقيقة في المادة إلى انحراف واضح غير ملتبس للضوء من أحد الألياف إلى ليفة

(2) Q. Chen [et al.], «Crosslinked C60 - Polymer Breaches the Quantum Gap,» *Nano Letters*, vol. 4, no. 9 (2004), pp. 1673-1675.

أخرى ليطلق في مسلك ضوئي جديد نحو غايته المقصودة. والتكهنات المايكروية (Microcavities) هي أقفاص للضوء تحتجز الفوتونات داخل أحجامها الضئيلة، مسببة تراكم أعداد هائلة من الفوتونات داخل حاوية صغيرة. والتكهنات المايكروية مثلها مثل شوكة رنانة شديدة الرنين تهتز في تردد واحد نقي فقط، وتتميز بانتقائيتها العالية للضوء اعتماداً على لونه.

إن احتجاز الضوء ذو فائدة، لأنه يتيح تحكماً معززاً على سلوكيته. لكن الأمر يتطلب جهداً متميزاً، فالضوء يتوق للانطلاق، وهذا ما يميزه عن الالكترونات التي تعود إلى خيارها الذاتي، متى ما عجّلت إلى سرع كبيرة. أما الضوء، فهو إما أن ينطلق بسرعة 300 مليون متر في الثانية، أو إذا ما احتجز فسيتم على الأغلب امتصاصه وسيفقد طاقته. لذا، فإن التحدي يتمثل في الحفاظ عليه نشطاً وهو مقيد في أسره. والضوء يشبه في هذا الخصوص حيوان الباندا، وقد قام الباحثون مؤخراً باحتجاز الضوء ضمن أصغر قياس يمكن تصوره، وهو الطول الموجي للضوء ذاته ويبلغ بضع مئات من النانومترات، فقد قام يوشيو ياماموتو(3) (Yoshio Yamamoto) من جامعة ستانفورد في كاليفورنيا ببناء مرايا ذات عاكسية فائقة وجمعها كأزواج بحيث إن الضوء احتجز فيما بينهما كما في الصورة أدناه.

(3) G. S. Solomon, M. Pelton, and Y. Yamamoto, «Modification of Spontaneous Emission of a Single Quantum Dot,» *Physica Status Solidi*, vol. 178 (2000), pp. 341-344.



تكهفات الموقع المايكروي التي تحدد الضوء إلى حجم صغير (بموافقة من مجلة *Nature*)

وبتقى طاقة الضوء محتجزة بين هذه الأدوات لمدة طويلة قبل أن تُفْلِت، كما في الشوكة التي تستمر في رنينها لمدة طويلة بعد أن تستحثّ. ويحدث الاحتجاز بواسطة الارتداد، فالموجات قد تنطلق جيئة وذهاباً بسرعة عالية لكن طاقتها تبقى في النهاية ثابتة. وأهمية التكهفات المايكروية لا تكمن في التحويل وحسب بل بسبب كيفية تحويلها لسلوكية الضوء المنتج داخلها أيضاً. وأعد ياماموتو مصادر لفوتونات أحادية بهذه الطريقة تقوم بإطلاق فوتونات مفردة بانتظام متكامل، فالمصدر الضوئي التقليدي ـ مثل مصباح كهربائي ـ تطلق الفوتونات عشوائياً، أما الأداة التي أعدها ياماموتو، فقد قامت بإطلاق الفوتونات واحداً كل مرة وحسب الأوامر: أي أنها مصدر عديم الصوت للفوتونات الحاملة للمعلومات.

وقد قام كيري فاهالا[4] (Kerry Vahala) وفريقه في كالتيك في

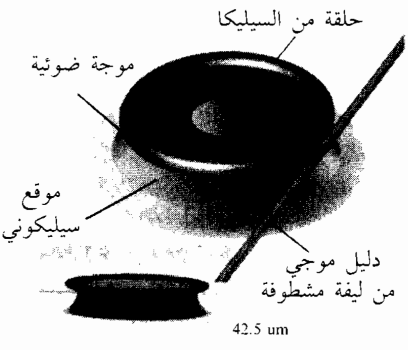
(4) D. K. Armani [et al.], «Ultra-High-Q Toroid Microcavity on a Chip,» *Nature*, vol. 421 (27 February 2003), pp. 925-928.

باسادينا بكاليفورنيا ببناء حلبة سباق بدل قفص للضوء. وتعتمد بنى فاهالا الكروية والدائرية كلتاهما على أسلوب بهو الهمس (Whispering gallery): يقوم الضوء لدى فاهالا ـ بدل الارتداد جيئة وذهاباً عبر محور معين كما لدى ياماموتو ـ بالدوران في دوائر محددة ملاحقاً ذَنَبَه للإمساك به.

وتذكِّرنا هذه الأدوات بالصوتيات في مسرح دائري تنطلق فيه همهمة من إحدى الشرفات حول المسرح لتدور بصورة كاملة لامسة كل فرد جالس حول المحيط وتعود في النهاية إلى المتكلم الأصلي بصورة صدى.

واستخدمت التظاهرة الأولى الناجمة لهذه الفكرة كرات زجاجية مثالية.

لكن فاهالا قام مؤخراً بإعادة إبراز نجاحه في بنية أكثر ملائمة بدرجة كبيرة، وهي قرص مستو على رقاقة. وكانت الفوتونات المطلقة داخله تختزن لأكثر من مئة مليون تذبذب موجي. وكان من الضروري جداً لهذه الأداة أن تمتلك سطحاً علوياً صقيلاً على المقياس الذري وهو ما تمكن فاهالا من خلال أخذ القرص خلال حالة سائلة في أثناء التصنيع، معززاً انعكاسية السطح الذي يبغيه مثلما تصقل **الكريما** (*Crème Brulée*) التي تعرض للهب خشونة السكر المبعثر لتعطيه سطحاً صقيلاً كالمرآة.



حلقات فاهالا (Vahala) المايكروية محفورة في الزجاج ومربوطة إلى العالم الخارجي بواسطة ارتباط رقيق إلى ليفة ضوئية

وقد تم إنشاء التكهنات المايكروية لتعزيز تحكمنا على مصير الضوء بصورة مثيرة. إن إمكانيتنا على احتجاز الفوتونات والتلاعب بها لم تبدأ بتحقيق إمكانياتها الهائلة مقارنة ببراعتنا على العمل مع الإلكترونات سوى الآن فقط، فنحن نستطيع في الدوائر المتكاملة ربط مئات الملايين من الترانزستورات، وقد أتاح لنا هذا الربط المعقد لعناصر وظيفية بسيطة نمواً لوغاريثمياً متوالياً في صقل إمكانيات الحواسيب الإلكترونية. أما العدد الفوتونية فهي لم تصنع حتى اليوم إلا فُرادى ومن ثم ربط واحدة مع الأخرى. هل سنتمكن بدل ذلك من تصنيع شبه موصل للضوء؟ إن الباحثين يفتشون عن منصة تكنولوجيا للتحكم المتكامل والمهذب بالفوتونات.

بناء شبه موصل للضوء

إن خواص البلّورات شبه الموصلة في التحكم في سريان التيار الكهربائي هي المسؤولة عن النجاح الباهر الذي برزت منه ثورة المعلوماتية. والشيء المركزي لسلوكها هو الانتظامية أو الدورية في اصطفاف ذراتها المرصوفة مثل البيض في كارتونة، ومن ثم تنظم عمودياً في طبقات متتالية أيضاً. والبلورات عندما تُسحق تتحول إلى مكعبات متكاملة ذات أحجام مليمترية وذلك تجلٍّ عياني لمستويات الهشاشة الذرية على القياس النانومتري، فعندما تترتب الذرات بطريقة منتظمة تقوم بتوليد ذبذات دورية للاجتذاب والتنافر، فترى الإلكترونات تنظيمة توافقية من الجبال والوديان وتشكل هذه المنظر المتموج الذي يجب أن تتدفق عبره.

وتشبه الإلكترونات التي تعبر هذه التموجات حجارة تنزلق ـ أو تفشل في الانزلاق ـ على سطح ماء متموج، فالحجارة التي تقذف بالسرعة الصحيحة بالضبط ستنزلق بدون جهد من قمة إلى قمة. أما

إذا قذفت بسرعة عالية أو واطئة فستعاق بين الموجات وستسقط بسرعة إلى القعر. وفي أشباه الموصلات تستطيع الإلكترونات التي تمتلك الطاقة الملائمة فقط الانزلاق فوق قمم الموجات إلى ما لانهاية تقريباً. أما الإلكترونات التي تفتقد هذا الرنين فستحتجز بسرعة لكونها عديمة الحظ في بحثها عن الموج ما بين كوبا وميامي. ويقال إن الإلكترونات التي تمنع من الانتشار تقبع في فجوة النطاق الموجي - موضع التطهير في عملية النقل.

أطلقِ الإلكترونات التي تنزلق بسهولة فوق قمم الموجات وسيكون لديك مادة موصلة. أطلقِ الإلكترونات بحيث تصطدم مباشرة في جدران عمودية وستكون لديك مادة عازلة. وما بين الاثنين سيكون لديك شبه موصل يمكن تصميم موصليته عبر مدى واسع. ويقوم مهندسو أشباه الموصلات بجعل بعض مناطق شبه الموصل موصلة، والأخرى عازلة، ويدمجون الاثنتين ليحصلوا على ترانزستور. وتساءل الباحثون في الفوتونيات وهم يحسدون إخوانهم العاملون في الإلكترونيات في الثمانينات، ما إذا كان بإمكانهم الحصول على تحكم مماثل: أي أن يبتدعوا وسطاً يستطيعون ضمنه من ممارسة تحكُّم على انتشار الضوء، وبرز ميدان فجوات النطاق الموجي الفوتونية (Photonic Bandgaps) سنة 1987، فقد نشر باحثان في الوقت ذاته فكرة فجوة النطاق الموجي في المجلة الفيزيائية المرموقة (Physical Review Letters). وكان إيلي يابلونوفيتش (Eli Yablonovitch) آنذاك في مختبرات بلْ ليقوم إثر ذلك بالانطلاق في حياته المهنية في جامعة كاليفورنيا في لوس أنجليس. أما ساجيف جون (Sajeef John) فكان في طور إكمال رسالة مابعد الدكتوراه في هارفارد، وسيشغل بعد ذلك موقعاً في الهيئة التدريسية في جامعة تورنتو.

واستخدم كل من يابلونوفيتش وجون النظرية الرياضية الأساسية التي تصف الضوء لإظهار أن الفوتونات مثل الإلكترونات يمكن احتباسها في فجوة في النطاق الموجي. وقاما بمقارنة المعادلات التي تصف كيفية سريان موجات الفوتونات والإلكترونات. وبدأت كلتا المعادلتين برسم الحركة الموجية وانتهتا بتمثيل طاقة الأمواج. وما كان قد حشر بينهما كان التموجات الخارجية، أي شكل موجات الماء التي سينزلق فوقها الحصى. وكان ذلك المنظر الخلفي لبلورات أشباه الموصلات ـ أي الجبال والوديان ـ كما تبدو للإلكترونات داخل البلورة. وفي حالة الفجوات في النطاق الموجي الفوتوني، كانت كثافة المادة التي فتحت منها البلورة المجازية ستقوم بالتحكم في مصير الضوء.

وقام يابلونوفيتش بتحري التناظر الوظيفي بطريقة يمكن لباحثين في رقاقات أشباه الموصلات فهمها: عندما تحشد الذرات في تنظيمات مثالية ينجم عنها فجوات في النطاق الموجي للإلكترونات ويجب بطريقة مماثلة أن ينشا عن تنظيمات مثالية دورية من مواد ضوئية شديدة التباين فجوات في نطاقها الموجي للفوتونات.

ولم ينظر جون إلى القضية من خلال عدسة بلورات نظامية متكاملة بل من خلال مياه متكسرة غير منتظمة، وبيَّن أن سعة الموجات إذا ما كانت كبيرة بما فيه الكفاية ستقوم باحتجاز الضوء ضمن ما يقارب فجوة موجية واحدة.

وما أن تم تصور نظرية فجوات النطاق الموجي الفوتوني بقي السؤال: من سيطلق الفكرة في العالم؟ أي من سيبرهنها عملياً ويقوم باحتجاز الضوء في مواد دورية ثلاثية الأبعاد بالغة التباين؟ وانقسم الباحثون إلى معسكرين وإلى طريقتين للتفكير: طريقة «من القمة إلى الأسفل»، وأخرى «من القعر إلى الأعلى». وسيقوم الذين يفكرون

من القمة نزولاً بحفر الأشكال من كتل النحت الموجودة مسبقاً للكشف عن الروح الفوتونية لحجرهم الصابوني(*)، وقد يقومون بمراكمة كارتونات متكاملة من البيض ويكدسونها الواحدة فوق الأخرى بدقة تفوق بكثير موجات الضوء التي ستقتنص.

وقام الباحثون في مختبرات سانديا الوطنية في نيومكسيكو سنة 1998 ببناء بنى كوم خشبية طبقة فوق طبقة، لكنها لم تكن من الخشب بل من السيليكون. وكان من الضروري بسبب طبيعة العملية الطباعية أن توضح مواصفات كل طبقة في المادة المقاومة للضوء منفردة ومن ثم ينقل شكلها إلى السيليكون تحتها وتجعل الطبقة مستوية للسماح للطبقة التالية في الكومة الخشبية لكي توضع فوقها، وهكذا تكرر العملية مع مراصفة مناسبة لكل الطبقات التالية بالنسبة للأصلية. ووفر عمل مختبرات سانديا فجوة في النطاق الموجي الفوتوني في بُعد موجي أطول بعشر مرات من الألوان المستخدمة في الاتصالات.

وقد طور أندرو تيوبرفيلد (Andrew Tuberfield) وزملاؤه في جامعة أوكسفورد طريقة لبناء بلورات فوتونية بواسطة ومضة ضياء واحدة ثلاثية الأبعاد بدل بنائها طبقة فطبقة. ولم تكن السكين إنما الهولوغرام(**) هو من قام بنحت هذه البنية الدقيقة. وقام تيوبرفيلد بنحت مادة لدنة مقاومة للضوء يمكن أن تنحل بعدما تتعرض للضوء. وقام بوضع مجموعة من حُزَم اللايزر أُطلقت بزوايا مختلفة وتجمعت داخل طبقة سميكة من مقاومة الضوء. وقامت الحزم عند التقائها

(*) الحجر الصابوني (Soapstone): حجر لين أخضر اللون يستخدم لنحت التماثيل.

(**) هولوغرام (Hologram): سطح مستو يبدي في إضاءة مناسبة شكلاً ثلاثي الأبعاد، كما يمكن أن يبرز منه في الهواء شكل ثلاثي الأبعاد.

بجمع أنفسها لتشكل موجة فائقة، وذلك عند التقاء قمم موجاتها، أو أنها ألغت بعضها البعض عندما التقت قمم بعضها مع قعر الأخرى. وبهذه الواسطة ابتدع تيوبرفيلد شكلاً معقداً من شدة الضوء وطبعة على البوليمر. وعندما تم شطف الأجزاء القابلة للذوبان كان المتبقي بلورة فوتونية.

وقدم نجاح جديد لمعسكر «القمة نزولاً» من جهود هانك سميث[5] (Hank Smith) والمتعاونون معه في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا. وتم بناء هذا الهيكل بحفرة طبقة بعد طبقة. واستخدم الهيكل دعامات منتصبة بصورة مستقلة قطر الواحدة 70 نانومتراً، وهي معالم دقيقة بصورة ملفتة للنظر يتم تكرارها بنائياً، ومتراصفة فوق العديد من الطبقات باستخدام الطباعة بالحزمة الإلكترونية.

ووحد هذا الجهد ـ مثل بقية الجهود في هذا الميدان ـ الباحثين المتمكنين من تصميم مشبكات فوتونية جديدة من أولئك الذين يستطيعون تشييدها ودراستها.

ولا يمكن عند هذا المستوى الرفيع من التطور فصل عملية التصميم عن البناء، فمن السهل عرض بلورة على بساط البحث لا يمكن بناؤها، لكن التحدي يكمن في اختراع مشبك يمكن للبنّاء النانوي تشييده فعلاً.

وأحرز ساجيف جون وجيف أودن (Jeff Odin) وهنري فان دريل[6] (Henry Van Driel) ومعاونوهم في تورنتو وفي إسبانيا

---

(5) Minghao Qi [et al.], «A Three - Dimensional Optical Photonic Crystal with Designed Point Defects,» *Nature*, vol. 429 (3 June 2004), pp. 538-542.

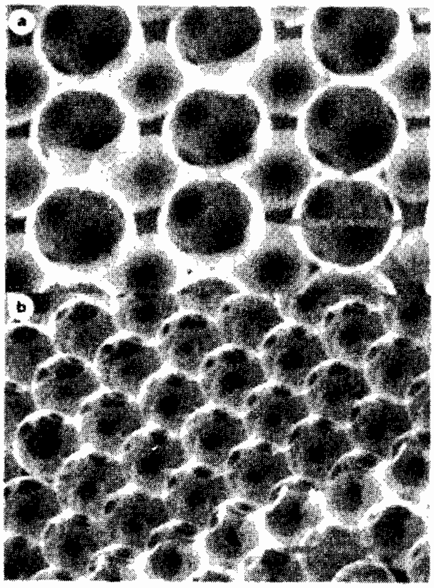
(6) Alvaro Blanco [et al.], «Large-Scale Synthesis of a Silicon Photonic Crystal with a Complete Three- Dimensional Bandgap Near 1.5 Micrometers,» *Nature*, vol. 405 (25 May 2000), pp. 437-440.

نجاحاً رئيسياً من بين معسكر «من القعر صعوداً» سنة 2001. فقد كان معسكر من القعر صعوداً في السنين السابقة لهذا الإنجاز يستحثون الطبيعة لكي ترتب أعداداً لا تحصى من كرات مايكروية زجاجية متماثلة في تنظيمات اعتيادية محشودة بإحكام، وهي بلورات فوتونية ذاتية التنظيم تزداد تكاملاً.

ولم تبدِ هذه التنظيمات على أي حالة الفجوة في النطاق الموجي الفوتوني كاملة، وهي مدى من الترددات يمنع فيها الضوء الساقط بأي زاوية، في الأطوال الموجية المستخدمة في الاتصالات بالألياف الضوئية. وقامت هذه البلورات الفوتونية بدل ذلك بتغيير تجربة الضوء لكنه استطاع في كل الحالات إيجاد طريقة للهروب. والأسد الذي يستطيع الهروب بالمشي من خلال جانب القفص ليس محبوساً بطريقة جيدة. كان المطلوب من الباحثين بناء مادة تباينت مكوناتها بدرجة أشد في خواصها الضوئية من الزجاج أو الهواء. وسيبنون أيضاً طوبوغرافيا توقّعها ساجيف جون ملائمةً لاحتجاز الضوء. وكان الباحثون في فالنسيا (Valencia) ومدريد قد أتقنوا وسائل صنع القالب:

مشبك من الكرات الزجاجية ذات الحجم والمسافة البينية الصحيحة فقط. وقامت المجموعة بتسخين بلورتها الزجاجية حيث تماسّت مع بعضها. وقام أودين ومعاونوه بملء الثقوب في الهيكل بالسيليكون، وهو مادة ذات كثافة ضوئية أكبر جداً من الكرات الزجاجية. واستخدموا مادة كيميائية لإزالة المشبك الإسباني فقط تاركين البلورة المعكوسة المصنوعة من السيليكيون.

وبين فريق فان دريل أن الهيكل المستحصل جعل الضوء المستخدم في الاتصالات يرقص حسب الطلب.



البلورة الفوتونية المصنوعة من قبل فريق تورنتو ـ بلنسية ـ مدريد. التأمت الكرات حيث تماست مع بعضها وأنشأت هيكلاً تم تحويله إلى وسط لفجوة في المدى الفوتوني.

دمج الضوء مع الإلكترونيات، الاتصالات مع الاحتساب

إن الشبكات المستندة إلى الضوء ليست ذات اكتفاء ذاتي، فهي تزوِّد بالمعطيات من قبل الحواسيب والهواتف الخلوية والعديد من سواها من أجهزة المعلومات. ويمكن قول الشيء نفسه عن شبكتنا للنقل الجوي التي ذكرت في مماثلة سابقة، فمطار شارل ديغول لا يمكن أن يتواجد لوحده، لكنه متكامل بأناقة، فالقطارات السريعة تمر تحته، ويمكن للركاب الذهاب من الطائرات إلى نظام باريس لممرات الدراجات.

ولما كانت الإنترنت في كل مكان، يمكن أن تكون هناك حاجة لنفس التكامل والترابط بين الشبكات، فبيت كل منا مسلّك، والشبكة اللاسلكية من الهواتف الخلوية وهواتف بلاك بيري (Black Berries) والمساعدات الرقمية الشخصية (PDAs) وشبكات واي فاي (WiFi) تجعل الإنترنت عامة الوجود. والارتباطات اليوم بين الأدوات

اللاسلكية والشبكات الإلكترونية في البيت والمكتب والألياف الضوئية للاتصالات بعيدة المدى مربكة وغير ملائمة، فحواسيبنا تثبّت من خلال دوائر سيليكونية متكاملة، وهواتفنا الخلوية تستخدم دوائر متخصصة مصنوعة باستخدام زرنيخيد الغاليوم (Gallium Arsenide)، وهو شبه موصل أكثر كلفة وأكثر غرابة ولا يتماذج من السيليكون، أما اللايرزات التي تشغل شبكات الألياف الضوئية فتستند إلى نوع آخر من البلورات غالية الثمن. وتجمع هذه الشبكات البيتية واللاسلكية والضوئية بطريقة سمجة. إن واقعيتنا المادية لم تلحق مع متطلبات التقاء شبكاتنا.

إن الحاجة إلى الالتقاء تجعل تحويل موادنا الإلكترونية، مثل السيليكون، إلى مواد فوتونية أمراً بالغ الأهمية. والسيليكون في حالته الطبيعية ليس بالمنتج الكفوء للضوء، فالموجات الإلكترونية لا تجتمع سوية بسهولة لتطلق اختلافاتها في الطاقة بشكل فوتون. لكن الباحثين اكتشفوا في التسعينيات أن السيليكون يمكن أن يحوَّر لكي ينتج الضوء بكفاءة. وقاموا بتحليل البلورة الأحادية المتكاملة للسيليكون مبتدعين بلورات بحجم نانومتري تستطيع الإلكترونات الإقامة فيها، وبدأت الإلكترونات فيها بإنتاج الضوء بصورة فورية. ولاحظت مجموعة في جامعة ترنتو (Trento) في إيطاليا في سنة 2000 كسباً ضوئياً[7] - وهو المكون الرئيسي لصنع اللايزر - من بلورات السيليكون النانوية.

وبعد سنتين ركّزت مجموعة في شركة إنتل[8] إمكانياتها على

(7) L. Pavesi [et al.], «Optical Gain in Silicon Nanocrystals,» *Nature*, vol. 408 (23 November 2000), pp. 440-444.

(8) Ansheng Liu [et al.], «A High - Speed Silicon Optical Modulator Based on a Metal - Oxide- Semiconductor Capacitor,» *Nature*, vol. 427 (12 February 2004), pp. 615-618.

ابتداع مضمّن ضوئي (Capital Modulator)، وهو أداة تصنع المعلومات على الضوء القادم من اللايزر، وذلك باستخدام أسلوب كان متوفراً آنذاك لإنتاج معالِجات البنتيوم (Pentium) التي تصنعها إنتل. ويقوم المضمن ذو الأساس السيليكوني بطبع الرسالة المحتواة في إشارة كهربائية على حامل ضوئي. وجمع مضمّن إنتل خير ما في الإلكترونيات ـ سهولة تصنيعها وكلفتها الواطئة ـ مع السرعة والأداء المطلوبين في الضوئيات. وقامت في نهاية 2004 وبدايات 2005 مجموعة بهرام جلالي (Bahram Jalali) في جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس أولاً، ليتبعها ماريو بانيسيا (Mario Paniccia) من شركة إنتل بصنع اللايزرات باستخدام السيليكون.

إن تحدي لاتمازجية الأنواع المختلفة من أشباه الموصلات ممكن أيضاً، وذلك بتنفيذ زواج إجباري بين بلورات تختلف المسافات بين ذراتها.

وقد حظي هذا الأسلوب بنجاح ملحوظ مؤخراً، فقد أظهرت مجموعة جين فيتزجيرالد (Gene Fitzgerald) في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا أن شبه الموصل المصنوع من زرنيخيد الغاليوم المستخدم في الهواتف النقالة يمكن أن يبنى بنجاح على السيليكون رغم اختلاف المسافات البينية للذرات في نوعي أشباه الموصلات ومن دون التضحية بالأداء. واستخدمت فيتزجيرالد طبقات حاجزة، وهي بلورات معترضة يسوي السيليكون وزرنيخيد الغاليوم خلافاتهما فيها.

ووافقت أشباه الموصلات على وضع كل خلافاتها في هذه الطبقة المعترضة.

وهذا الأسلوب واعد طالما كان في الإمكان عبر الزمن الحفاظ على الاختلافات داخل هذه الأرض الحرام بدل أن تؤدي إلى اشتباكات حدودية.

وقد قام الباحثون مؤخراً بوضع مواد ضوئية على أخرى إلكترونية من دون أي استخدام للبلورات تساعد على إنسجام النوعين، فبدلاً من إنماء البلورة الضوئية فوق البلورة الإلكترونية، يقوم الباحثون بصنع مواد ضوئية إلكترونية بصورة سائلة ويلفونها بغلاف جزيئي ثم يقومون بنشر الصبغ الذي يحصلون عليه على قمة السيليكون. ويتبخر السائل المستخدم لتثبيت جسيمات نقاط الكم النانوية، وما يتبقى هو غشاء للجسيمات النانوية المغلفة جيداً. وقد أفاد الفريق الذي يقوده أوري بانين (Uri Banin) في الجامعة العبرية في القدس ومجموعتي في جامعة تورنتو والمتعاونون فلاديمير بيولوفيتش (Vladimir Bulovic) ومونجي بافاندي(9) (Moungi Bavandi) من معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا مجتمعين، بوجود تقدم ملحوظ عبر هذا المسلك منذ سنة 2001. وقد قامت كل مجموعة بصنع مصدر ضوئي للاتصالات على الرقاقة أو ضمن

---

(9) Nir Tessler [et al.], «Efficient Near - Infrared Polymer Nanocrystal Light - Emitting Diodes,» *Sciences*, vol. 295 (22 February 2002), pp. 1506-1508; L. Bakueva [et al.], «Size - Tunable Infrared (1000-1600 nm) Electroluminescence from PbS Quantum - Dot Nanocrystals in a Semiconducting Polymer,» *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 17 (2003), pp. 2895-2897; J. S. Steckel [et al.], «1.3 mu to 1.55 mu Tunable Electroluminescence from PbSe Quantum Dots Embedded within an Organic Device,» *Advanced Materials*, vol. 15, no. 21 (2003), pp. 1862-1866; Tung - Wah Frederick Chang [et al.], «Efficient Excitation Transfer from Polymer to Nanocrystals,» *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 21 (2004), pp. 4295-4297; Steven A. McDonald [et al.], «Solution - Processed PbS Quantum Dot Infrared Photo-Detectors and Photovoltaics,» *Nature Materials*, vol. 4, no. 2 (2005), pp. 138-142; Edward H. Sargent, «Infrared Quantum Dots,» *Advanced Materials*, vol. 17 (8 March 2005), pp. 515-522, and Brian L. Wehrenberg and Philippe Guyot-Sionnest, «Electron and Hole Injection in PbSe Quantum Dot Films,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. 125 (2003), pp. 7806-7807.

الشبكات. وقد أعلنت مجموعة تورنتو مؤخراً أننا كنا قادرين على صنع متحسس ضوئي ـ وهو أداة تقيس الإشارات الضوئية تحت الحمراء التي تُحمل على شبكة ضوئية ـ بمستويات واعدة من الكفاءة. كما أفادت فرق في المختبر الوطني في لوس ألاموس (Los Alamos) وفي جامعة تورنتو وبصورة منفصلة، ملاحظة كسب ضوئي ـ وهو ضروري لعمل اللايزر ـ في أطوال موجية مطلوبة في الاتصالات وكل ذلك يستند إلى أغشية من الجسيمات النانوية تطلى على رقاقة سيليكونية.

القيام بقتل المسافة

ماذا لو استطعنا توحيد الإلكترونيات والفوتونيات والمترجمات في ما بين الاثنين ـ الإلكترونيات الضوئية ـ بطريقة ملائمة على رقاقة واحدة؟

سيمكن عند ذلك استخدام الضوء في كل موضع يكون ذلك فيه مؤاتياً، ولن يقتصر ذلك على دواخل الألياف الضوئية كما هي الحالة اليوم، بل سيقوم بربط الرقاقات مع بعضها وحتى بربط الوحدات الفرعية داخل الرقاقة. ويعتبر الاستهلاك العالي للطاقة وحرارة الرقاقة العالية أكثر العوامل التي تعيق التقدم إلحاحاً في الدوائر الإلكترونية المتكاملة، ويعتبر استخدام الضوء كوسط للاتصال على الرقاقة حلاً ممكناً، فهو قادر على نقل الحد الأعلى من المعلومات بينما يستهلك الحد الأدنى القوة.

إن التشبيك باستخدام الضوء مدمجاً مع التحويل المستمر بين الاتصالات الإلكترونية واللاسلكية والضوئية يعني ما هو أكثر من الاهتمام المتناقص التدريجي بالمسافة المادية الذي رأيناه في العقود الماضية: مكالمات هاتفية بعيدة المدى بكِلَف أقل،

وإرسال فيديوي متقطع عبر الإنترنت.

وسيقود هذا في النهاية إلى موت المسافة، فإذا ما كان حاسوبان تبلغ المسافة بينهما نصف محيط الأرض يتشاركان بالمعلومات بنفس القرب الذي يتشارك به حاسوبان في نفس الغرفة فسيمكن عندئذ دمج مجموع الحواسيب في العالم في حاسوب فائق واحد هائل.

لقد تذوقنا لأول مرة طعم إعادة التوحيد العالمي للحواسيب من هذا النوع، فالمناظر التي تصون شاشة الحاسوب (Screen Savers)، التي تبحث عندما لا يكون الحاسوب يعمل عن إشارات قد تخبرنا عن حياة خارج الكوكب، تقع ضمن هذا النوع. إنها بداية للاحتساب المشبك الذي تصبح فيه كافة موارد الحاسوب العالمية حوضاً واحداً هائلاً. وستصبح الحواسيب في النهاية مشبكة مع بعضها البعض بدرجة لن يفتقد معها أي منها إمكانية معالجة البتّات. وسندفع بدل ذلك بتفكيرنا بعيداً: إن اكتشاف الأدوية على سبيل المثال قد يُسرَّع، مع تصور ودراسة بنى بروتينية جديدة للارتباط بالخلايا السرطانية، وكل ذلك في لحظة داخل حاسوب ملتف حول الأرض.

وقد رأينا حتى الآن إشارات لما قد يكون ممكناً، فقد قامت جامعة بنسلفانيا بتطوير مشبك ومستودع إلكتروني لسجل البيانات الطبية، وهو نظام يقترض النطاق الكامل لملفات العناية الصحية للمريض من أي موقع، ويشمل ذلك الصور الطبية عالية الوضوح والسجلات والتاريخ السريري. وكانت سلسلة السجلات سابقاً غالباً ما تنقطع، مثلما يحدث عند قيام مريضة بالتصوير الشعاعي للثدي في مواقع مختلفة. ويتيح النظام الجديد للأطباء رؤية كافة السجلات ذات العلاقة خلال ثانيتين إلى تسعين ثانية ومن ثم معالجة مرضاهم

بمستوى جديد من الكفاءة والاستجابة. ومثلما توفر الشبكة الكهربائية التي توصل الكهرباء إلى بيوتنا احتياجاتنا للطاقة بطريقة مستقلة عن الموقع الجغرافي، فستقوم شبكات الحواسيب بتسوية أرضية المعلومات حينما تُبتذَل، وستتوفر المعلومات في أي موقع تبرز فيه الحاجة بلمح البصر.

إن موت المسافة سيمكن استخدامه للتفاعلات البينية للناس ولن يقتصر على الأنظمة الحاسوبية ومستودعات البيانات. لقد تم التبشير بانتهاء عهد السفر لأجل الأعمال منذ عقود، لكننا اليوم، رغم عالم البريد الإلكتروني والمؤتمرات الفيديوية والمكالمات الهاتفية لازال الناس يطيرون عبر القارات لمقابلة أناس آخرين. لماذا؟ لأن المسافة في عالم اليوم لازالت حية وفعالة:

فنحن لم نقم حتى الآن باستخدام التكنولوجيا لاختلاق حاسية الوجود ـ لمسة رائحة وشعور بكونك هناك- من مسافة بعيدة. وحتى لو استطعنا تمثيل هذه التجارب الحسية بطريقة مقنعة لا نمتلك الآن سعة شبكية كافية لإرسال هذه التجارب ذات السعة الرقمية الهائلة إلى أي محل في العالم بطريقة قابلة للتكرار ولحظوياً. سيتطلب الأمر جداراً ذكياً لتصوير جانب مدينة طوكيو في الطاولة وبطريقة متقنة في غرفة الاجتماعات الافتراضية.

وهناك حاجة للهو كرامات للتعبير عن الأبعاد الثلاثية، كما سيتطلب الأمر حضوراً شبيهاً بالحي وملابس متحسسة للتعبير عن اللمسة عبر آلاف الأميال.

وما أن نحقق ذلك فإنه سيعني أن ليس من أعذار لنا لإبداء تفصيل لما ندعوه زملاءنا. وسيصبح موهوبو العالم مورداً موحداً.

ولن تكون هناك حاجة للأصدقاء ليعيشوا في نفس البلدة:

فالأصدقاء الذين يقودون دراجاتهم سوية ويعيشون في بوسطن وتورنتو يمكن فعل ذلك كلٌ في مدينته مع توليد الشعور بالقرب مدمجاً ومنقولاً لحظوياً.

وليس هناك حاجة بعد الآن للمدراء التنفيذيين للطيران عبر القارات للعب (السكواش) وليدبر علاقاته. سيقومون بدل ذلك بدمج الأوصاف ذات العلاقة للواقع المادي في ذلك الحين من غير أن يكونوا مجبرين على توحيد الوجود المادي لذراتهم، فذرتا كاربون هما ذاتهما، ولا علاقة لذلك بالساحل الذي يرسيان عليه، كما هي الحالة أيضاً مع ذرتي أوكسيجين. وكل ما هو ذو أهمية فعلاً هي المعلومات التي تصف موقعهما النسبي وطاقتهما وما يحيط بهما.

إن هذا المنظور يضع المعلومات في موقع أسمى من المادة ويدعم رؤية متميزة بوضوح من إعادة بناء غريتا غاربو من القعر صعوداً. إنه يعيد اختلاق التجارب عبر الزمان والمكان ويشارك بتخيلاته مع الناس والأماكن مقتنصاً وناقلاً ومعبراً هذه التي يمثلها ببراعة.

لكن هل يجب على المنظورين الجزيئي والمعلوماتي للعالم أن يقفا متضادين؟

لا أبداً، ولا يمكنهما في الحقيقة فعل ذلك. ومثلما هي الحالة مع الضوء والإلكترونات في الشبكات، فإن الموضوعية والمجازية في الأدب والتجربة والنظرية في العلم والصرامة والإبداعية في كافة المناحي والتحكم الحقيقي بعوالمنا المتوازية ـ الافتراضي والملموس ـ سيتم اكتسابها فقط حالما نرى ونذلل تكامليتها.

ولكي يكون رقص الجزيئات شيئاً ما غير حلبة للرقص المجنون، فنحن بحاجة إلى تصاميم ملهمة للرقص.

خاتمة

التهذيب

لقد أخذَنا تَجْوالُنا في عوالم الكيمياء والفيزياء والبيولوجيا والمعلومات، ورأينا كيف يمكن تسخير الإلكترونات والفوتونات والذرات وتجمعاتها لحل مشاكل الصحة والبيئة الطبيعية وتفاعلاتنا مع بعضنا البعض ومع الالآت من صنع الإنسان. لكن ما الذي ربط هذه المواضيع المتباينة؟ إذ لم تكن موحدة بواسطة قاعدة علمية مرشدة واحدة، ولم يستثنِ أيُّ تكريس متزمت للنانومتر كل الأفكار الأخرى المشوقة، ولم تصرّ أي دغمائية (Dogmatisme) على التأثيرات الكمية فقط، ولم يربح التجميع الذاتي الكيميائي «من القاعدة صعوداً»، ولا النحت للمادة «من القمة نزولاً» إلى يومنا هذا. إن تباين المواضيع التي زرناها في **رقص الجزيئات** تصور التكنولوجيا النانوية على أنها ليست مجموعة واحدة من القواعد أو التطبيقات العلمية.

هل هي إذن مشروع ذهني متماسك؟ والتكنولوجيا النانوية كونها ثقافة أكثر مما هي محتوى تمثل استشراقاً مفعماً بالنشاط وإعادة تقييم لما يجب أن يعزز في عملية وغاية العلوم والهندسة.

والتكنولوجيا النانوية هي بحث فعال عن الالتقاء بين الاختصاصات المتباينة تقليدياً، وسعي لرؤية وحدة الأفكار، فالباحثون في شبكات الحاسوب، وهم مزودون بدقائق الغبار، يبحثون عن الإلهام من جموع النحل.

ويقوم فيزيائيو أشباه الموصلات بالبحث بين البروتينات الحيوية للعثور على تلك التي تتيح تحكماً سلساً على الجسيمات النانوية للاكتشاف المبكر للسرطان.

ويستغل أخصائيو طب العيون تحكُّم صانعي الرقاقات على السيليكون لإعادة البصر إلى العميان. والتكنولوجيا النانوية هي انبعاث لعلوم عصر النهضة في زمن لا يمكن أن يكون فيه عالم حقيقي من عصر النهضة.

لقد نمت شجرة المعرفة لتصبح عديدة الفروع: إذ لا يمكن لباحث فرد أن يكون خبيراً متقدماً في الكيمياء الفيزيائية وهندسة الأنظمة الإلكترونية وبيولوجيا السرطان في الوقت ذاته، ومع ذلك ضَمِنَ حسنُ الحظ أن اكتشافات الباحثين ضمن هذا الإطار الجديد ليست محدودة على ما يستطيع الباحث استيعابه في ذهنه شخصياً، فإذا ما استطاع العثور على مشاركين ذوي مهارات ومعرفة متكاملتين فسيستطيعون سوية تجميع الخبرة المطلوبة للقيام بأعمال ذات نوعية متميزة وأهمية عملية.

إن تبادل المعلومات عن إمكانيات التكنولوجية النانوية ومناهجها وإنجازاتها يكتب أهمية أساسية. وقد كان ذلك ذا أهمية دوماً:

فالباحثون يقرّون منذ زمن بعيد بالفضل لمن يرعاهم، أي من هم اليوم دافعو الضرائب الذين يستثمرون في البحوث الصرفة والتطبيقية. ولن يتمكن الباحثون من دون استثمارات المجتمع من

إجراء التجارب في مختبراتهم ليل نهار، ولن يقدروا على طرح الأفكار عرضياً، معقولة كانت أو مخبولة، لكي تخضع للتمحيص لوضعها في صيغة مختلفة أو لترفض.

وتعزز الطبيعة كثيفة التشبيك للتقدم التكنولوجي النانوي أهميةَ التبادل الواسع لأحدث الأفكار العلمية، وسوف لن يستطيع الباحثون الآخرون والمصممون والسياسيون والمترجمون ومعماريو الخلفيات الطبيعية ـ وكلهم أناس مبدعون ومحبون للاستطلاع في ميادين قريبة وبعيدة ـ من العمل معنا نحو أهداف مشتركة ما لم نزودهم بالأفكار والمعرفة التي يحتاجونها.

وفي تسعينيات القرن الماضي صاغ بوب ميتكالف (Bob Metcalf)، مخترع الإيثرنت (Ethernet) ومؤسس شركة (3Com)، القانونَ الآتي «إن الاستفادة من الشبكة لا تنمو بنسبة خطية مع عدد مستخدميها بل مع مربع عدد مستخدميها»، فشبكة الهاتف لم تكن شبكة عندما امتلك كل من صديقين جهاز هاتف، لكن عندما أصبح كل منا يمتلك هاتفاً في بيته أصبحت الكرة الأرضية كلها جيرتنا. أما الآن، حيث يحمل كل منا هاتفاً حيثما يذهب، فقد أصبحت جيرتنا الكونية سحابة مائعة من الموجود الدائمي مكاناً وزماناً، وتنتشر أصواتنا وأفكارنا وعواطفنا خلال الأثير حسب أوامرنا.

ويحدث الشيء نفسه ـ في حالات مفردة إلا أنها محولة إلى انفجارات إبداعية ـ عندما تتوحد كوكبات متفرقة من أفكار جديدة في شبكات فعالة. إنها كتل حرجة إبداعية، فعندما تكون الكيمياء الحيوية مملكة مغلقة للكيميائيين الحيويين ستكون ابتكاراتها وتقدمها مقصورة على تداول الأفكار ضمن مجموعة ثابتة. لكن تبادل المعرفة بين مجموعة متنوعة من العلماء الفيزيائيين أدى إلى استخدام الـ «دي. أن. آي.» المصمم خصيصاً لإنماء جسيمات نانوية مصممة خصيصاً

لإضاءة خلايا السرطان بأطوال موجية تتيح استكشافها حيثما تكون الأنسجة شفافة.

وإذا ما انطلقت هذه الاكتشافات عبر المجتمع العلمي الذي يشمل بين آخرين الممارسين الطبيين، فقد نتعلم كيفية نقل هذه المفاهيم الجديدة إلى تطبيقات سريرية.

وهناك إضافة احتمال أكبر لتبني هذه الاكتشافات من مقاومتها. وإذا ما تكلم الباحثون مبكراً عن مفاهيمهم المنبثقة، فسيتمكن الفلاسفة والأخلاقيين وصناع السياسة من بين آخرين من توقع المخاطر والمنافع ـ الفكرية والأخلاقية والمجتمعة ـ للاختراقات العلمية، وسيتمكنون من عمل شيء ما قبل أن يولِّد، انهمارُ كمٍّ غير محدد من الإمكانيات، الخوفَ.

التسعينيون يعانون من موت مبكر فاجع

سنتمكن في المستقبل وبصورة متزايدة من اكتشاف السرطان وإيقافه قبل أن ينمو، بالاستخدام الموجَّه للعقاقير. وسنستطيع من خلال تجديد الخلايا طبياً استبدال المكونات التالفة في القلب والأوعية الدموية قبل أن تفشل كلياً، وقد ارتفع معدل المدى العمري في أمريكا الشمالية من 48 سنة في سنة 1900 إلى 77 سنة في سنة 2000. لنفترض أننا لن نحافظ على هذه الزيادة في المدى العمري بل أننا سنسرعها، فهل سيزداد معدل المدى العمري إلى ما يزيد على مئة سنة خلال خمسين عاماً؟ وإذا ما حصل ذلك فهل سيكون التحسن في نوعية الحياة متماشياً مع الكم؟ إن هدف إطالة الحياة يجب أن لا يكون ابقاءنا شيوخاً لمدة أطول بل الحفاظ على شبابنا.

إن كلفة الكم من غير تحسين في النوع أمر مدمر. لقد حدث انتشار كبير لمرض ألزهايمر في العقود الأخيرة بسبب بداياته المتأخرة

مقرونة بتوقع لأعمار أطول. ويعاني ثلاثة بالمائة من الناس بين عمري أربعة وستين وأربعة سبعين من مرض ألزهايمر بينما يبلغ عدد من يعانون منه بعد سن الخامسة والثمانين حوالى النصف تقريباً. ويقول صديق يعمل في مستشفى أن مرضى القلب اليوم يعيشون ما فيه الكفاية ليعانوا من كوكتيل أغنى بكثير من متلازمات، مقارَنةً بما كانوا سيعانون منه قبل سنين. وفي حين كانت نوبة قلبية ستقتله يوماً ما إلا أنه يبقى على قيد الحياة اليوم بعد نوبة قلبية ويعيش ما فيه الكفاية ليعاني من السكتات الدماغية والفشل الكلوي ثم سيعاني من ألم الساق الأسكيمي (Ischemic Leg).

هل سنضيف ثلاثين سنة من العمر لكن ليس من الحياة في نهاية زمننا على الأرض؟ ومن حسن الحظ أن نفس أنواع التقدم التي تطيل الحياة تميل إلى تحسين نوعيتها أيضاً، فالبحوث في الخلايا الجذعية والعلاجات الجزيئية، يمكن أن تعالج مرض ألزهايمر. وتقوم الأدوية الحديثة المصممة خصيصاً باستهداف التهاب المفاصل والسرطان وأمراض القلب والأوعية الدموية والسكتات الدماغية. وتنتج الأنسجة المهندسة خصيصاً عظاماً مهندَسة بيولوجياً وأوعية دموية وعضلات وأعصاب لإصلاح أو استبدال الأعضاء لدى المسنين. وهناك سابقة لتقنيات إطالة العمر فيما يخص إطالة نوعية الحياة أيضاً: فمن هم في سن الستين اليوم يتمتعون بنفس صحة من كانوا في الخامسة والأربعين من عمرهم سنة 1900.

لنفترض أن كل من مدة ونوعية الحياة سيمكن إطالتها بصورة ملحوظة، فما الذي سيعنيه ذلك بالنسبة للمجتمع؟ إن دورات الحياة ستتغير إضافة، فخياراتنا حول متى سندرس أو نصرف أو نتزوج أو ننجب أو نعمل أو نتقاعد ستتأثر بعدد السنين التي نعتقد أننا سنبقاها. ومثلما ستعيش حياة مختلفة لو اكتشفت أن لديك شهراً واحداً

لتعيشه، فإن أسلوب حياتك ستيغير عندما تجد أن لديك ثمانين عاماً أخرى.

ولن تكون هناك أيام أخرى تتمتع بها بالشمس دون عامل الوقاية من الشمس(*). وقد تتغير عادات الإنفاق لدى أولئك الذي يبغون العيش حتى المائة والأربعين عاماً. وقد انضغط المدى العمري لحمل الأطفال مؤخراً: فالنساء يؤجلن حملهن لكنهن يواجهن بإلحاح حقيقة قلة خصوبتهن عندما يصلن نهاية العقد الرابع من عمرهن. وقد يساعد التقدم الإضافي في تقنيات الإنجاب خارج الرحم النساء في إنجاب الأطفال ـ مع مجازفة وكلفة مقبولتين ـ في الخمسينيات والستينيات والسبعينيات. إن خيار إنجاب الأطفال سيمتد عبر العمر، وبذلك يزول الانضغاط على الحمل بالأطفال.

وستكون المترتبات على الديناميكة جسيمة. إن أفضلية التودد تكمن في العقد الثالث من عمر المرأة وفي العقد الرابع من عمر الرجل. لكن الإنجاب الذي يتجاهل العمر قد يسوّي هذا الموقف.

والمترتبات المالية جسيمة أيضاً، إذ إن قفزة فجائية في التعمير قد تعني فقدان جيل من الميراث، وذلك عند قيام أجداد الآباء الذين يعمرون حتى المائة وثلاثين عاماً باستنفاد مدخراتهم المالية. إن خطط التقاعد الحالية التي راهنت على أن المتقاعد الوسطي سيموت خلال خمسة عشر عاماً بعد تقاعده، ستبرهن على كونها قليلة التمويل بدرجة ميؤوس منها. وسوف لا تمتلك الأجيال القادمة من المنتجين ودافعي الضرائب خيار التقاعد في سن يقارب الخامسة والستين.

(*) يقصد به المؤلف نوع من المرهم الذي يطلى على الجلد للوقاية من الأشعة فوق البنفسجية، ويعرف باسم Sun Protection Factor أو SPF.

وقد يكون ذلك ملائماً لهم، لأن الحياة في سن الستين ستكون منتصف العمر وربما تكون طموحاتهم بعيدة عن أن تتحقق.

وينظر اليوم إلى الدراسة كمشروع مدى الحياة، وستزداد صحة هذا كلما تسارع تقدم العلم والتكنولوجيا. تصور ـ في هذه الذكرى السنوية المئوية لاكتشاف إينشتاين للتأيّن الضوئي الكهربائي ـ إذا ما كان طالب مولود سنة 1885 قد أنهى دراسته التقليدية سنة 1905 ومازال يساهم علمياً اليوم في سنّه البالغة 120 عاماً. كان يجب عليه أن يحصّل عبر مساره الحياتي كل الفيزياء الحديثة وتقنية أشباه الموصلات والحواسيب عندما كانت تبرز، وعلينا نحن وأطفالنا في المستقبل أن نتعلم الكثير الكثير عبر أزماننا الحياتية.

القوة العسكرية: الفجوة تنمو

تمتلك العديد من التقنيات التي بحثنا فيها في هذا الكتاب تطبيقات عسكرية، فالأعضاء المصممة خصيصاً تمثل إضفاءً فائقاً على الجنود من البسالة المادية غير المتكافئة، وستحمي ملابس المعركة الفعالة الجنود من غاز الأعصاب، كما ستنعشهم عندما يصابون بجراح. والخيم الشمسية المحمولة ستعمل بهدوء مقتنصة القوة في الصحراء، وسيبث الغبار الذكي الذي ينثر على أرض العدو وعاداته دون أن يُرى. ويمثل التمويل الحربي ضمن المبادرة النانوتكنولوجية القومية في الولايات المتحدة ـ وهي مجموعة الاستثمارات الاتحادية في التقنية النانوية ـ نحو 30 في المئة من مجموع الإنفاق.

والولايات المتحدة هي المنفق الرئيسي في البحث والتطوير العسكري على مستوى العالم وتمثل ثلثي الإنفاق من هذا النوع عالمياً، والذي يبلغ 52 مليار دولار سنة 2002. ويمتلك كل صنف

عسكري ضمن جيش الولايات المتحدة برامج في التقنية النانوية. وتشمل الفعاليات رفيعة المستوى استثمار الجيش الأمريكي البالغ 50 مليون دولار لإنشاء معهد للعلوم النانوية.

ويمثل الاستثمارات في التقنية النانوية العسكرية بصورة علنية على التركيز على التقنيات الدفاعية، وبخاصة تلك الهادفة إلى حماية الجنود في ميدان المعركة. ويشمل المنظور الإرشادي لمعهد نانوتكنولوجيا الجند بزة قتال تحمي الجندي ضد الرصاص (أي مادة ممتصة للطاقة) يمكنها عند الطلب حماية الجندي من العوامل الكيميائية والبيولوجية (مسامات نانوية قابلة للتحويل)، وتوفر اتصالات ذكية وتشبيكاً يمكن أن يبدل اللون لتوفير التمويه، كما يمكنها تسليط قوة إما لمساعدة لابسها في حمل الأثقال (بدلة عضلية) أو في كبس الجروح، وتستطيع أن تتحسس الإشارات الحيوية للجندي، وتعمل بموجب تلك المعلومات، كأن توصل الدواء عندما تبرز الحاجة.

وتهدف هذه التقنيات إلى حماية حياة الإنسان، وباستطاعتها توفير القوة لجهود حفظ سلام يسهل تنفيذها ومساعدة الدول النامية على فرض الشرعة العالمية لحقوق الإنسان مع التقليل من المخاطر على أفرادها. مع ذلك، تترتب على هذه التقنيات في الوقت ذاته من خلال خفض إمكانية إصابة جنود الأمم الغنية إمكانيات هجومية. إن نقطة الضعف الكبرى في أي قرار عسكري في العالم الغربي هو الثمن العالي الذي يوضع على حياة المحاربين. كان الطلب للميزانية الحربية للولايات المتحدة سنة 2005 يبلغ (420,7) مليار دولارات، لكن الاهتمام القومي لم يتركز على هذا الصرف قدر تركزه على كلفة حياة الجنود الأمريكيين. ويمكن للديناميكية الكونية أن تتغير إذا ما استطاعت الولايات المتحدة التدخل في أي بيئة عسكرية ـ بما في

ذلك التدخل على الأرض ـ بمجازفة ضئيلة للغاية على حياة جنودها. إن التقليل من إمكانية إصابة الجندي الغربي يمكن إحرازه في الحالة القصوى من خلال الغائه كلياً من ساحة المعركة، وقد تتيح التقنيات الجديدة في الحقيقة القيام بحرب برية من دون ناس. ويتضمن «الإشتباك من دون أفراد» عربات قتال صغيرة خفيفة الوزن برية أو جوية يُسَيْطَر عليها من بُعد. إن القانون الدولي للحرب يتطلب ببساطة إمكانية المقاتل على تمييز المقاتلين من غير المقاتلين أو أولئك المصابين أو الراغبين بالاستسلام، وذلك ما هو ممكن بشكل متميز بواسطة التقنيات الحالية، وسيتم بطريقة أفضل في المستقبل.

ويمكن للتقنية النانوية وللتقنيات الأوسع ذات الأساس العسكري أن تزيد من إمكانية الغرب على شن حرب «نظيفة» تكون أعباؤها الوطنية مالية فقط ولا تتضمن كلفة إنسانية. كيف ستختار الأمم التي ستكون الحرب بجانبها معاركها من دون دماء؟

الطاقة والبيئة: التقليل من الاتكال المتبادل كونياً

تتخذ الطاقة والبيئة موقعاً مرتفعاً في الأجندة العامة، وهناك أسباب وجيهة لذلك، فالطاقة المختزنة في الوقود الأحفوري محدودة وملوثة عند إطلاقها. وتستورد الولايات المتحدة اليوم نصف احتياجاتها من النفط، وتتأثر سياساتها في الشرق الأوسط ـ بما في ذلك غزوها للعراق ومهادنتها العربية السعودية ـ بهذا الواقع البراغماتي. كيف سيتغير اقتصاد أمريكا والدور السياسي العالمي الذي تختطه لنفسها إذا ما كانت مكتفية من حيث متطلباتها للطاقة؟

ويمكن تصور مثل هذا الاعتماد على الذات من خلال المزيج الصحيح من الاختراقات التقنية والمبادرات الجريئة. لقد استطاعت الولايات المتحدة التغلب على تحديات هائلة أخرى من خلال

الاستثمار المركَّز: مشروع مانهاتن ومشروع أبولو(*) مثالان على ذلك. إن إرسال إنسان إلى القمر في مشروع أبولو تطلب استثمار 100 مليار دولار. لكن المهمة في العراق تكلف الولايات المتحدة مئات مليارات الدولارات.

ومن الواضح أن أمريكا تمتلك التمويل والإرادة لتقوم بهذا الاستثمار. ومع ذلك فإن الكونغرس قام بتشذيب ميزانية المؤسسة القومية للعلوم (NSF) في تشرين الثاني/ نوفمبر 2004 بنسبة 1,9 في المئة مخفضاً إياها إلى ما مقداره 5 مليارات دولار فقط.

وتستثمر المؤسسة عبر العلوم الصرفة والتطبيقية مغطية كافة ميادين العلوم الطبيعية (الكيمياء والبيولوجيا والفيزياء وكافة الفروع الهندسية).

إن هذه الاستقطاعات تساعد على تفهم سبب عدم حصولنا على الاختراقات الشبيهة بأبولو في الطاقة. ويحاول العديد مناقشة إطلاق «جهة ثانية» بكلفة 100-200 مليار دولار لتحرير الولايات المتحدة من اعتمادها على النفط. وثمار هذا الاستثمار مرئية على الأفق. وقد قدم الفصل عن الطاقة التقدم في التقنية النانوية وما حولها، مما يمكن أن يساعدنا في التحول الضروري نحو الطاقة المستدامة لأن مستوى استخراج الوقود الأحفوري يصل قمته، فبإمكان الخلايا الشمسية الكفوءة وذات الكلفة الزهيدة وعلى مساحة كبيرة تذليل قوة الشمس وهي مصدر لطاقة تصل الأرض وتفوق بعشرة آلاف مرة كافة أنواع الطاقة التي نستهلكها اليوم.

(*) برزت في السنين الأخيرة شكوك قوية حول صحة إيصال إنسان إلى القمر في مشروع أبولو. ويقول الشكاكون إن الأفلام التي تبث كانت مصطنعة على الأرض. انظر الموقع: http://clavius.org والموقع: http://www.aulis.com وعلى الشبكة تفاصيل هذه القضية.

والخلايا الشمسية لوحدها لن تكون كافية أبداً، لأن تزويدها الطاقة مرتبط مباشرة إلى الشمس لكننا نصر على استهلاك الطاقة حتى في الليل وفي الأيام الغائمة.

وهكذا، فإن تقنيات اختزان الطاقة للاستخدام في أوقات أخرى يجب أن تتماشى مع مناهج حصد الطاقة ويجب أن تكون وسائل الخزن هذه نظيفة. لذا، فإن الاختزان وإعادة التحويل ثانية إلى طاقة كهربائية، باستخدام تقنيات مثل خلايا الوقود الهيدروجينية، جزآن ضروريان في استراتيجية الطاقة.

والتساؤل على إمكانية مصدر واحد من التصدي لكافة احتياجاتنا للطاقة أمر مشوق ذهنياً، لكن الحقيقة هي أن مستقبل الطاقة سيبدو مثل فسيفساء من تقنيات التوليد والخزن ـ وهي فسيفساء أنظف وأكثر إستدامة مقارنة بالحالة الآنية، فالهيدروجين والشمس والريح مصادر للطاقة ملفتة للنظر، لكن تقنياتها واقتصادياتها ليست أكيدة. أما الطاقة النووية، «والفحم النظيف» الذي يتم فيه احتجاز ثاني أوكسيد الكاربون المنتج، وكذلك الغاز الطبيعي، فلا تتمتع بتلك الجاذبية لكنها أفضل من بعض الطرق المستخدمة اليوم، وقد تشكل جزءاً مهماً من طور انتقالي. ويمكن للتغير في العادات، بما في ذلك الحفاظ على الطاقة أن يمتلك تأثيراً إيجابياً هائلاً: وأحد الأمثلة هو أن 20 في المئة من الكهرباء يستهلك للإنارة، ويمكن لوسائل الإنارة المتقدمة أن تحل محل المصابيح المتوهجة ومصابيح الفلورسنت (Fluorescent)، يمكن لهذه الأساليب الحديثة التي تستخدم الديودات المشعة للنور أن تخفض استخدام الطاقة على المستوى العالمي بنحو 10 في المئة، مما يعني توفيراً يبلغ مئة مليار دولار.

إن الفوائد المباشرة لاستراتيجية الطاقة المستدامة والنظيفة تتكلم عن نفسها، فبعض تأثيراتها المصاحبة قد تختلف الآراء حولها. ويمكن لأمريكا الشمالية ذات الاعتماد الذاتي في أمور الطاقة، وقد

تخلصت من وطأة الهموم البراغماتية، أن تختار اتخاذ موقف سياسي تحركه المبادئ الصرفة في السياسة العالمية وقد خفضت رهاناتها الاقتصادية في المجتمع الدولي من خلال اكتفائها الذاتي في الطاقة.

التقنية النانوية والاختيار: إنه ليس صغرها بل كيف تستخدمه

إن الأمثلة من واقع التقنية النانوية الآني وإمكانياتها المستقبلية مستَلَّةٌ من الصحة والبيئة، والمعلومات تصور نقطة تشمل كافة أنواع التقدم التكنولوجي، فأي أداة تمتلك القوة يمكن أن تُستخدم لإسداء نفع هائل أو قد تسبب مِحَناً لا يُسْبَر غورها: إن الكلمات يمكن أن تلهم الأمم لكي تعتنق التسامح أو الكراهية، والمعلومات قد توحد أو تفرق، والفهم الطبي قد يستخدم للتشخيص والشفاء أو للتعذيب والقهر. والثروة يمكن أن تنمي الراحة التي تسبغها الصلات الوثيقة أو قد تزيد من المعاناة التي يسببها التباين.

كيف تقرر المجتمعات أياً من السبيلين ستختار؟

إنهم لا يفعلون ذلك، بل يسلكون كليهما، وهم على أي حال يمتلكون بعض الاختيار في الأهمية النسبية، أي النسبة بين الخير والشر الذي يفعلون، وهم في وضع أفضل إذا ما اتخذوا خيارهم عندما تكون أدوات تلك التكنولوجيا في مرحلة الصقل. لذا، فمن الإلزامي على المبتكرين في التقنية النانوية أن يُعلموا الجميع بالاهتمام الفكري العميق والأهمية الكامنة في عملهم بالنسبة للفرد. ومن الضروري أن تكرس الدول اهتمامها بهذه المعلومات وأن تعمل بموجبها داخلياً وعالمياً. ومن المهم لشعوب الدول الديمقراطية أن لا تستميلهم الوفرة اللاعقلانية أو القنوط غير المناسب، ويجب بدل ذلك أن يقحموا أنفسهم في النقاش حول العلم والهندسة، وحول تحكمنا المتنامي على قدر عالمنا الطبيعي والمادي، يدفعهم إلى هذا الشغفُ الذي نكنه لمستقبلنا.

ثبت المصطلحات

Communication	اتصالات
Ethics	أخلاقيات
Implantation	ازدراع
Organ Transplant	استبدال الأعضاء
Cloning	استنساخ
Radiation	إشعاع
Optoelectronics	إلكترونيات ضوئية
Digital Camera	آلة تصوير رقمية
Fiber Optics	ألياف ضوئية
Bucky Tube	أنبوب بكي
Internet	إنترنت
Dispersions	انتشار
Polymer	بوليمر
Environment	بيئة
Molecular Biology	بيولوجيا جزيئية
Adult Stem Cell	خلية جذعية بالغة
Embryonic Stem Cell	خلية جذعية جنينية

Neuron	خلية عصبية
Cell Pluropotent	خلية متعددة الإمكانيات
Integrated Circuit	دائرة متكاملة
DNA	دي. أن. آي.
Atom	ذرة
Biochip	رقاقة بايولوجية
Computer Chip	رقاقة حاسوبية
Mirco Chip	رقاقة مايكروية
Zeolite	زيولايت
Cancer	سرطان
Retina	شبكية (العين)
Semiconductor	شبه موصلة (مادة)
Quantum Size Effect	تأثير الكم الحجمي
Transistor	ترانسستور
Photonsynthesis	تركيب ضوئي
Diagnosis	تشخيص
Magnetic Resonance Imaging	تصوير بالرنين المغناطيسي
Feedback	تغذية مرتجعة
Integration	تكامل
Cracking	تكسير
Communication Technology	تكنولوجيا الاتصالات
Nano Technology	تكنولوجيا نانوية
Hyberdization	تهجين
Nano Particle	جسيمة نانوية
Molecule	جزيئة
Cell	خلية

Astrocyte	خلية التآم جرح نجمية
Stem Cell	خلية جذعية
Triode	صمام ثلاثي (الكتروني)
Vocium Tube	صمام فراغي
Energy	طاقة
Regenerative Medicine	طب تجديدي
Catalyst	عامل حفاز
Radiotherapy	علاج بالإشعاع
Combination Therapy	علاج توافقي
Chemotherapy	علاج كيميائي
Nerve Gas	غاز أعصاب
Molecular Sieve	غربال جزيئي
Bandgap	فجوة نطاق موجي
Fermion	فرميون
Photonics	فوتونيات
Fullerene	فولرين
Correspondence Principle	قاعدة التوافق
Uncertainty Principle	قاعدة المشكوكية
Optic Gain	كسب ضوئي
Supramolecular Chemistry	كيمياء ما فوق الجزيئية
Plastics	لدائن
Laser	ليزر
Photo Detectors	متحسس ضوئي
Chemical Detectors	متحسس كيميائي
Atomic Force Mircroscope	مجهر القوة الذرية
Electron Mircroscope	مجهر إلكتروني

Transmission Electron Mircroscope	مجهر إلكتروني عاكس
Scanning Tunneling Electron Microscope	مجهر إلكتروني ماسح ثاقب
Biomimetics	محاكاة بيولوجية
Catalytic Converter	محول حفاز
Life Expectancy	مدى حياتي
Implant	مزدرع
Scaffolde	مرتقى
Amplifier	مضخم
Optical Amplifier	مضخم ضوئي
Scaling	ملائمة القياس
Quantum Mechanics	ميكانيكا الكم
Communication Theory	نظرية الاتصالات
Radioactive Waste	نفايات مشعة
Quantum Dot	نقطة الكم
Tissue Engineering	هندسة الأنسجة
Interface	وجه التقاء
Tumor	ورم (مرضي)

الثبت التعريفي

أنابيب نانوية كاربونية (Carbon Nanotubes): الأنابيب النانوية هي شكل متأصل (Alltrope) لعنصر الكاربون ذات بنى نانوية لها نسبة طول إلى قطر تزيد على مليون. وهذه الجزيئات الأسطوانية للكاربون تمتلك خواص تجعلها ذات فوائد عديدة في الإلكترونيات والضوئيات وأوجه أخرى علمية وصناعية.

وهي تمتلك قوة فائقة وخواص كهربائية متميزة، كما أنها نقّال جيد جداً للحرارة. وهي من عائلة جزيئات الفوليرين (Fullerene) (انظر كُرات باكي في الثبت التعريفي)، إذ إنها تمتلك واحدة من نهايتيها أو كلتيهما مقبَّبَة بكرة باكي. وقطر الأنبوب النانوي لا يزيد على بضعة نانومترات، بينما يصل طوله إلى ملليمترات، وقد تكون أحادية الجدار أو ذات جدران متعددة (أنابيب متداخلة). وتتواجد الأنابيب النانوية بشكل حزم تتماسك فيما بينها ويمكن دمجها سوية باستخدام ضغط عال لينتج عن ذلك أسلاك ذات أطوال غير محدودة وقوة تحمُّل كبيرة جداً بحيث يقترح البعض استخدامها كعناصر بناء معمارية.

بوليمر (Polymer): البوليمرات هي مواد ذات جزيئات تمتلك

وزناً مولارياً (Molar Weight) عالياً وتتألف من عدد من الوحدات المكررة تدعى الواحدة منها مونومير (Monomer). وهناك بوليمرات متواجدة طبيعياً، مثل السيليلوز وبعض أنواع البروتينات، كما يوجد عدد كبير جداً من البوليمرات التركيبية المصطنعة تشمل كافة أنواع اللدائن، مثل البولي إيثيلين (Poly Ethylene) والبولي ستايرين (Poly Styrene) وغيرها. وهناك اليوم قاعدة صناعية واسعة جداً لتصنيع البوليمرات التي تستخدم في العديد من نواحي الحياة وتعوض عن المواد الطبيعية في الآلات الصناعية والأجهزة المنزلية والملابس والأثاث وغيرها.

جسم مضاد (Antibody): الجسم المضاد هو جزيئة بروتينية معقدة ينتجها الجسم عندما يشعر بوجود مولد مضاد. وهذه الخاصية موجودة لدى جميع الحيوانات اللبونة. وعادة يتحد الجسم المضاد مع المولد المضاد، ونتيجة لذلك إما أن يصبح المولد المضاد فريسة سهلة لبعض الخلايا في الدم التي تقوم بافتراسه وتخلص الجسم منه، أو أن المضاد من خلال اتحاده مع جزيئة المولد المضاد يجعل الثانية غير فعالة. ويحدث في بعض الحالات أن يستمر وجود الأجسام المضادة في الجسم بعد اختفاء المولدات المضادة، وهذا ما يعطي مناعة للجسم ضد ذلك النوع من المولدات المضادة.

خلية جذعية (Stem Cell): تمتلك الخلية الجذعية خاصيتين تميزانها عن خلايا الجسم الاعتيادية:

أولاً ـ هي خلايا غير متخصصة تجدد ذاتها لفترات طويلة من خلال الانقسام.

ثانياً ـ يمكن تحت ظروف فسيولوجية مختبرية معينة جعْلها خلايا ذات وظائف معينة كخلايا قلبية نابضة أو خلايا بانكرياس منتجة للإنسولين.

هناك نوعان من الخلايا الجذعية **خلايا جذعية جنينية** (Embryonic Stemcells)، وتوجد في الكتلة الداخلية للجنين في مراحل تكونه الأولي، ويمكنها التحول إلى أي نوع من أكثر من 220 نوعاً من الخلايا المتخصصة في الجسم البشري، و**خلايا جذعية للبالغين** (Adult Stem Cells) وتوجد متفرقة في بعض أنسجة الجسم ويمكنها أن تتحول إلى عدد معين من الخلايا المختلفة.

ويسعى الباحثون العلميون إلى استخدام هذه الخلايا لتوليد خلايا استبدالية لبعض الخلايا أو الأنسجة البالغة في الجسم. ولم يصرح حتى الآن باستخدامها بشكل اعتيادي من قبل وكالات الدواء المتخصصة في أمريكا وأوروبا بانتظار البحوث عنها (وقد بدئ باستخدامها في الصين والهند).

خلية شمسية (Solar Cell)/ خلية ضوئية (Photovoltaic Cell): هي أداة إلكترونية تقوم بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية، وأساس عمل هذه الخلية هو التأثير (الفوتوفولطائي) الذي لاحظه أول مرة الفيزيائي الفرنسي بيكيريل (Bequerel) سنة 1839، إذ تقوم الفوتونات ـ في ضياء الشمس ـ التي تمتصها المادة (وهي عادة من النوع شبه الموصل) بإطلاق الإلكترونات من ذرات هذه المادة، وهذه بدورها مجبرة على التدفق في اتجاه واحد لكونها شبه موصلة، ونحصل بهذه الطريقة على دفق مستمر من الإلكترونات يمثل تياراً مستمراً (DC Current).

لكن الاستخدام العملي لهذه الظاهرة لم يستغلّ إلا بعد سنة 1946 حينما سجل راسِل أوهل (Russel Ohl) أول براءة اختراع لأداة عملية تولد الكهرباء بهذه الطريقة. واعتمد الجيل الأول من هذه الخلايا على طلاء من السيليكون المعكّر عمداً ببعض الشوائب الذي كان ذا حساسية عالية للضوء. وكانت كفاءة تحويل الطاقة في هذا

النوع من الخلايا بحدود 6 في المئة فقط. وتطور نوع المواد المستخدمة ليشمل مزيجاً من عنصري الغاليوم والزرنيخ مع قاعدة من الجيرمانيوم، ثم استخدمت مواد مثل تيلوريد الكادميوم وسيلينيد النحاس والأنديوم والغاليوم ومن ثم السيليكون اللامتبلور، وأدى هذا إلى تحسين كفاءة تحويل الطاقة حتى وصل إلى 38 في المئة سنة 2007. ومع تطور استخدام التقنيات النانوية بدأ العلماء باستغلال اللدائن المرنة الموصلة للكهرباء كأساس للمواد الفوتوفولطائية بدل الزجاج المستخدم سابقاً مما خفض كلفة إنتاج الخلايا الشمسية وفتح لها آفاق جديدة، لكن هذا النوع من الخلايا لازال ذا كفاءة أقل من كفاءة الأنواع التقليدية.

رقاقة إلكترونية (Electronic Chip): وتدعى أيضاً دائرة متكاملة (Integrated Circuit) أو دائرة مايكروية (Microcircuit) أو رقاقة سيليكونية (Silicon Chip) وهي دائرة كهربائية مقزمة يتم تصنيعها على سطح رقاقة من مادة شبه موصلة هي على الغالب من السيليكون وقد يكون من مواد أخرى كالجيرمانيوم. ومن أكثر أنواع الرقاقات الإلكترونية استخداماً المعالجات الدقيقة (Microprocessors) التي تعتبر المركز الدماغي للحاسوب أو لجهاز الهاتف المحمول أو للعديد من الأجهزة التي تعمل بطريقة مبرمجة.

روتاكسين (Rotaxane): الروتاكسين هي بنية جزيئية تتألف من جزأين: **الأول** حلقي **والثاني** يمتد ضمن الحلقة وله نهايتان كبيرتان تمنعه من الانفكاك عن الجزء الحلقي. وتوجد بعض جزيئات الروتاكسين الطبيعية في الأجسام الحية بينما يتم تركيبها مختبرياً لاستخدامها في الإلكترونيات الجزيئية كعناصر تحويل جزيئية وينجم استخدامها هذا من إمكانية تحريك الجزء الحلقي حول الجزء المحوري داخله حيث يعني كل موضع في الحركة إلى حالة مختلفة في الدائرة الجزيئية الالكتروينة.

زيـولايـت (Zeolite)/ غـربـال جـزيـئـي (Molecular Sieve):
الـزيـولايـت هـو مـادة مـعـدنـيـة ذات بـنـيـة مـسـامـيـة مـايـكـرويـة مـن الألومينوسيليكات. وهناك أكثر من مئة وخمسين نوعاً من الزيولايت المصنع وثمانية وأربعين نوعاً من الزيولايت الطبيعي. ويتمكن الزيولايت من احتواء الإيونات الموجبة مثل إيونات الصوديوم أو الكالسيوم، كما يمكن إزالتها منه بسهولة أيضاً. لذا فهو يستخدم لتنقية المياه من الأملاح.

والزيولايت هو نوع من أنواع المواد ذات المسامية العضوية التي تُعرف عادة باسم الغرابيل الجزيئية. ويطلق هذا الاسم على هذه المواد لأنها تتمتع بخاصية إمرار بعض الجزيئات وحجب مرور جزيئات أخرى اعتماداً على حجم الجزيئة. وسبب هذا هو الحجم المنتظم لمسامات كل صنف من هذه المواد. لذا تستخدم الغرابيل الجزيئية اعتماداً على نوع مادتها وحجم مساماتها لفصل الغازات في صناعة تنقية الغاز الطبيعي وفي فصل الأوكسيجين من الهواء للاستخدام الطبي.

أما الزيولايت فهو، إضافة إلى استخدامه في المبادلات الإيونية لتنقية الماء من الأملاح، يُستخدم في صناعة تكرير النفط كعامل حفاز في عملية التكسير المائع بالعامل الحفاز (Fluorized Bed Catalytic Cracking)، وهي عملية أساسية اليوم لزيادة غلة المنتجات الوسطى والخفيفة من النفط الخام. ويستخدم الزيولايت أيضاً لاقتناص المواد المشعة من مياه الفضلة في المنشآت النووية ولما كانت بنيتها من الألومينوسيليكات ذات متانة عالية ومقاومة للإشعاع، لذا يتم بعد امتلائها بالمواد المشعة كبسها وهي ساخنة إلى مادة خزفية (سيراميكية) شديدة الصلابة، حيث تسد مساماتها وتحتبس المواد المشعة داخلها، وهي طريقة تقلل من عامل الخطورة في مناولة النفايات النووية مقارنة بطرق المعالجة التقليدية.

كُرات باكي (Bucky Balls): كُرات باكي تسمية لجزيئات كاربونية ذات بنية مكورة ومنتظمة جداً تحوي 60 ذرة كاربونية. وقد سميت بهذا الاسم لشبهها بالقبة التي صممها المعماري الأمريكي بكمنستر فولر (R. Buckminister Fuller). وجزيئة الكاربون من هذا النوع التي تدعى أيضاً C_{60} هي النوع الثالث من الكاربون النقي بعد الماس والغرافيت.

وهي واحدة من عائلة الفوليرين (Fullerene) التي تحوي جزيئات كروية كاربونية تحوي 20 أو 26 أو 60 أو 70 أو 76 أو 84 ذرة كاربونية أو أكثر.

وهذه الجزيئة لها خواص كيميائية وفيزيائية متميزة فهي مقاوِمة للصدمة ويمكن استخدامها كمزيت صلب (أسوة بالغرافيت)، وهي قابلة للذوبان في العديد من المذيبات العضوية وتعطي محلولاً ذا لون بنفسجي داكن. ومن خواص كُرات باكي التي يمكن أن تكون ذات أهمية كبرى في المستقبل القريب، أنها ناقل للكهرباء ذو موصلية فائقة (Super Conductive) في درجات حرارية مرتفعة نسبياً، علماً أن العديد من المعادن تصبح ذات موصلية فائقة في درجات حرارية تقرب من الصفر المطلق (273.15 ـ درجة سيلسيوس) مما يتطلب استخدام الهيليوم المسيل لتبريدها، وهو مادة يصعب الحصول عليها وذات كلفة عالية. لكن الفوليرين يكتسب هذه الخاصية في درجات حرارية يمكن الحصول عليها بالتبريد بالنايتروجين المسيل (يغلي في درجة 196- سيلسيوس) وهو مادة أرخص جداً من الهيليوم المسيل، كما برزت بحوث حديثة تدعي إمكانية الحصول على موصلية فائقة في بعض أنواع الفوليرين في درجات حرارة الغرفة. ويمكن باستخدام الموصلية الفائقة تصنيع معدات ومولدات كهربائية ذات سعة كهربائية كبيرة جداً وبأحجام صغيرة.

مجهر إلكتروني (Electronic Microscope): هو مجهر يعتمد الإلكترونيات بدل الضوء المرئي لإنتاج صورة مكبرة وبخاصة للأشياء التي يقل بُعدها عن طول موجات الضوء المرئي. ويتمكن من تكبير الأشياء إلى أكثر من مليون مرة. كان إرنست راسكا (Ernest Ruska) الفيزيائي الألماني أول من فكر باستغلال الإلكترونيات لهذا الغرض، إذ أنها تمتلك خاصية موجية كما يمكن تركيزها بواسطة المغناطيس لتعمل عمل العدسات الزجاجية. وأدرك راسكا أن الطول الموجي للأشعة الإلكترونية الذي يقل كثيراً عن طول الموجات الضوئية سيتيح درجة عالية من التكبير. وصنع راسكا أول ميكروسكوب إلكتروني بسيط سنة 1933 ثم قامت مجموعة من الفيزيائيين الكنديين بصنع نموذج ذي نوعية جيدة سنة 1938. كما قامت شركة سيمنز بصنع أول مجهر إلكتروني تجاري في نفس السنة. وهناك عدة أنواع من المجهر الإلكتروني وهي:

- المجهر الإلكتروني النافذ (Transmission Electron Microscope)

- المجهر الإلكتروني الماسح (Scanning Electron Mircroscope)

- المجهر الإلكتروني العاكس (Reflection Electron Mircoscope)

- المجهر الإلكتروني الماسح الثاقب (Scanning Tunneling Electron Microscope)

وتستخدم المجاهر الإلكترونية رغم كلفتها الأولية والتشغيلية المرتفعة في العديد من الاختصاصات الطبية والعلمية وفي تصميم وفحص الدوائر الكهربائية على الرقاقات الإلكترونية الحاسوبية، وقد أضافت النانوتكنولوجيا استخدامات واسعة جديدة لهذه المجاهر.

مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscope): يعتبر هذا المجهر من أقوى أنواع المجاهر وأشدها تكبيراً. ويستخدم لهذا الغرض مجسّاً أو مسباراً ماسحاً (Scanning Probe). وتسمية هذا الجهاز في اللغة الإنجليزية (Microscope) فعّالة لأن الكلمة تعني (النظر) بينما يتم التكبير في هذا الجهاز من خلال المسح أو التلمس. ولهذا الجهاز بعض الميزات مقارنة بالمجاهر الإلكترونية، إذ لا يحتاج أن يعمل ضمن محيط من الفراغ العالي الضروري لعمل المجاهر الإلكترونية، كما أنه يعطي منظراً ثلاثي الأبعاد مقارنة بمنظر ذي بعدين في حالة المجاهر الإلكترونية لكنه لا يقوم إلا بمسح قطعة ذات أبعاد لا تتجاوز 150 ميكرومتر طولاً وبُعداً في حين تقوم المجاهر الإلكترونية بفحص مساحات تبلغ بضعة ملليمترات طولاً وعرضاً في كل مرة.

ويعتمد هذا المجهر على متحسس مركب يبلغ نصف قطر نهايته المدببة بضعة نانومترات مركب في نهاية عتلة تقوم بمسح سطح العينة. وتصنع العتلة من مادة بيزوكهربائية (Piezoelectric) تتميز بتغير مقاومتها حسب الجهد المسلط عليها. والجهاز مصمم بحيث يبقى المتحسس على مسافة ثابتة من السطح، أي أنه يتحرك إلى الأعلى عند وجود نتوء في السطح، ما يحني العتلة مولِّداً جهداً يغير مقاومتها للتيار الكهربائي الذي يتم قياسه بدقة لتقدير المسافة التي ارتفعت بها العتلة. وبهذه الطريقة يتم مسح طوبوغرافية السطح الذي يجري قياسه.

ويمكن بواسطة هذا الجهاز تصوير بنية عدد من المواد والتلاعب بها حتى المستوى الذري.

مولد مضاد (Antigen): المولد المضاد هو مادة قادرة عندما تلامس أو تتسرب إلى الجسم على استثارة رد فعل مناعي. ويحتاج

ذلك إلى تمييز هذه المواد من قبل الأجسام المضادة (Anibodies) أو من جزيئات متحسسة خاصة. موجودة في الجسم تدعى T-Cell) (Receptors والمولد المضاد هو على الأغلب بروتين غريب عن الجسم (أو جزء من البروتين). ويحدث أحياناً ـ في ظروف خاصة ـ إن بعض البروتينات الحيوية التي يصنعها الجسم قد تفسرها المتحسسات كمولد مضاد. يلاحظ أن البكتيريا والفيروسات ليست مولدات مضادة لكنها قد تفرز أو تحوي مولدات مضادة. وهذه المولدات يتم عزلها واستخدامها للتطعيم ضد تلك البكتيريا أو الفيروس.

ميكانيكا الكم (Quantum Mechanics): مع نهاية القرن التاسع عشر اعتقد الفيزيائيون أن علم الفيزياء قد وصل غايته، لكن مفارقة بعد مفارقة بدأت تبرز إثر ذلك، وبخاصة عند التعامل مع الظواهر الطبيعية في أحجام فائقة الصغر (الحجم الذري وما دونه) أو في درجات حرارية واطئة جداً أو في سرع عالية جداً أو في مستويات طاقة عالية جداً أو واطئة جداً، حيث تبين أن الفيزياء الكلاسيكية (النيوتونية) لم تكن وافية. وكان تراكم المعرفة لتفسير هذه الظواهر قد بدأ منذ بداية القرن العشرين، وذلك من خلال جهود عدد من العلماء الذين اقترحوا عدداً من النظريات الفيزيائية ووضعوا بعض الأسس الرياضية التي تشكل بمجموعها ما يعرف اليوم بميكانيكا الكم. ولم تلغِ هذه النظريات الفيزياء الكلاسيكية النيوتونية التي لازالت مطبقةً فيما عدا الحالات التي ذكرت في أعلاه. ومن هذه النظريات والقواعد العلمية.

سنة 1905 نظرية إينشتاين (Einstein) للتأثير الضوئي الكهربائي (Photoelectric Effect).

سنة 1913 نظرية بوهر (Bohr) لكمّ الأطياف (Quantum Theory of Spectra).

سنة 1922 قاعدة كومبتون (Compton) لتشتت الفوتونات من الإلكترونات (Scattering of Photons of Electrons).

سنة 1924 قاعدة باولي (Pauli) عن الاستبعاد (Exclusion Principle).

سنة 1925 نظرية هايزنبرغ (Heisenberg) التي سميت بنظرية ميكانيكا الكمّ المتكاملة (Full Quantum Mechanical Theory).

سنة 1926 معادلة شرودينغر (Schroedinger) عن الأمواج (Wave Equation).

سنة 1927 مبدأ هايزنبرغ (Heisenberg) المدعو بمبدأ المشكوكية (Uncertainty Principle).

نقاط الكم (Quantum Dots): نقطة الكم هي بلورة فائقة الصغر لها خاصية شبه موصل (Semi Conductor). يمكن الحصول على نقاط الكم من خلال:

1 ـ مزج مادة تصنيع نقاط الكم في محاليل خاصة حيث تصبح معلقة فيه، ثم يتم ترسيبها بمعالجة كيميائية خاصة ويمكن من خلال التحكم بهذه العملية الحصول على بلورات تحوي من مئة إلى مئة ألف ذرة وبحجم يترواح بين 2 إلى 10 نانومتر. وتستخدم هذه الطريقة لإنتاج أعداد كبيرة من نقاط الكم.

2 ـ التصنيع: ويجري هذا من خلال التجميع الذاتي لذرات مادة نقاط الكم ويتراوح حجم هذه النقاط بين 10 و50 نانومتر.

3 ـ التجميع الإلكتروكيميائي: تعتبر نقاط الكم ذات أهمية خاصة للاستخدامات الضوئية بسبب غلتها الكمية العالية نظرياً. ولنقاط الكم مستويات متميزة من الطاقة يمكن التحكم بها بواسطة

حجم البلورة إضافة إلى نوع مادة البلورة. وكلما ازداد حجم البلورة كان لون الضوء الناتج أقرب إلى الأحمر بينما يميل إلى الأزرق عندما يصغر حجم البلورة.

وعندما يسلط ضوء عادي أو من مصدر لايزري على نقاط الكم أو يسلط عليها تيار كهربائي، فإن نقاط الكم تشع نوراً براقاً من ذاتها. وتشمل فوائد نقاط الكم في استخدامها ككواشف عن الخلايا السرطانية في الجسم، كما أنها قد تستخدم كمصدر للإنارة يتميز باستهلاكه القليل للطاقة مقارنة بالمصابيح المتوهجة أو حتى بمصابيح الفلورسنت.

وقود أحفوري (Fossil Fuel): تشمل هذه التسمية كافة أنواع الوقود الذي يستخرج من باطن الأرض مثل الفحم الحجري (بأنواعه) والنفط الخام والمكثفات السائلة النفطية والغاز الطبيعي.

وجميع هذه المواد تحوي الكاربون، ويكون في حالة النفط الخام والغاز بشكل مركبات هيدروكاربونية. وتحترق هذه المواد في الهواء مولدة طاقة حرارية يستغلها الإنسان في العديد من الأشكال بصورة مباشرة للتدفئة أو لتحويلها من خلال مكائن خاصة إلى طاقة ميكانيكية ومن ثم في بعض الحالات إلى طاقة كهربائية.

المراجع

Periodicals

Abukawa, Haru [et al.]. «Reconstruction of Mandibular Defects with Autologous Tissue - Engineered Bone.» *Journal of Oral and Maxillafocial Surgery*: [vol. 62], 2004.

Alison, Malcolm R. «An Introduction to Stem Cells.» *Journal of Pathology*: vol. 197, 2002.

Alivisatos, Paul. «The Use of Nanocrystals in Biological Detection.» *Nature Biotechnology*: vol. 22, no. 1, January 2004.

Altmann, Jurgen and Mark Gubrud. «Anticipating Military Nanotechnology.» *IEEE Technology and Society Magazine*: Winter 2004.

Armani, D. K. [et al.]. «Ultra-High-Q Toroid Microcavity on a Chip.» *Nature*: vol. 421, 27 February 2003.

Atala, Anthony and Chester Koh. «Tissue Engineering Applications of Therapeutic Cloning.» *Annual Review of Biomedical Engineering*: vol. 6, 2004.

Bach, U. «Solid -State Dye - Sensitized Mesoporous TiO2 Solar Cells with High Photon - to - Electron Conversion Efficiencies.» *Nature*: vol. 395, 8 October 1998.

Ball, Philip. «Chemistry Meets Computing.» *Nature*: vol. 406, 13 July 2000.

Balzani, Vincenzo [et al.]. «Artificial Molecular Machines.» *Angewandte Chemie International Edition*: vol. 39, 2000.

Belcher, A. M. [et al.]. «Control of Crystal Phase Switching and Orientation by Soluble Mollusc-Shell Proteins.» *Nature*: vol. 381, 2 May 1996.

Bianco, Paolo and Pamela Gehron Robey. «Stem Cells in Tissue Engineering.» *Nature*: vol. 414, 1 November 2001.

Bishop, Anne [et al.]. «Embryonic Stem Cells.» *Journal of Pathology*: vol. 197, 2002.

Blanco, Alvaro [et al.]. «Large-Scale Synthesis of a Silicon Photonic Crystal with a Complete Three- Dimensional Bandgap Near 1.5 Micrometers.» *Nature*: vol. 405, 25 May 2000.

Burn, P. L. [et al.]. «Chemical Tuning of Electro-Luminescent Copolymers to Improve Emission Efficiencies and Allow Patterning.» *Nature*: vol. 5 March 1992.

Burroughes, J. H. [et al.]. «Light-Emitting Diodes Based on Conjugated Ploymers.» *Nature*: vol. 347, 11 October 1990.

Chang, Tung-Wah Frederick [et al.]. «Efficient Excitation Transfer from Polymer to Nanocrystals.» *Applied Physics Letters*: vol. 84, no. 21, 2004.

Chen, Christopher S. [et al.]. «Geometric Control of Cell Life and Death.» *Science*: vol. 276, 30 May 1997.

Chen, Q. [et al.]. «Crosslinked C60 - Polymer Breaches the Quantum Gap.» *Nano Letters*: vol. 4, no. 9, 2004.

Coe, Seth [et al.]. «Electron-Luminescence from Single Monalyers of Nanocrytstals in Molecular Organic Devices.» *Nature*: vol. 420, December 2002.

Collier, Charles P. [et al.]. «Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates.» *Science*: vol. 285, 16 July 1999.

———. «A [2] Catnane -Based Solid State Electronically Reconfigurable Switch.» *Science*: vol. 289, 18 August 2000.

Colvin, Vicki L. «The Potential Environmental Impact of Engineered Nanomaterials.» *Nature Bio-Technology*: vol. 21, no. 10, October 2003.

Corma, A. «From Microporous to Mesoporous Molecular Sieve Materials and their Use in Catalysis.» *Chemistry Reviews*: vol. 97, 1997.

Czarnik, Anthony W. «A Sense for Landmines.» *Nature*: vol. 394, 30 July 1998.

Desselhaus, M. S., G. Dresselhaus and A. Jorio. «Unusual Properties and Structure of Carbon Nanotubes.» *Annual Review of Materaials Research*: vol. 34, 2004.

Dodabalapur, Ananth. «Betting on Organic CMOS.» *Materials Today*: September 2004.

Dolmans, Dennis, Dai Fukumura and Rakesh K. Jain. «Photodynamic Therapy for Cancer.» *Nature Reviews - Cancer*: vol. 3, May 2003.

Forst, Clemens J. [et al.]. «The Interface between Silicon and a High - K Oxide.» *Nature*: vol. 427, 1 Januray 2004.

Friend, R. H. [et al.]. «Electroluminescense in Conjugated Ploymers.» *Nature*: vol. 397, 14 January 1999.

Gao, X. [et al.]. «In Vivo Cancer Targeting and Imaging with Semiconductor Quantum Dots.» *Nature Biotechnology*: vol. 22, no. 8, August 2004.

Gorman, M. E., J. F. Groves and R. K. Catalano. «Society Dimensions of Nanotechnology.» *IEEE Technology and Society Magazine*: Winter 2004.

Grant, Paul M. «Hydrogen Lifts Off - with a Heavy Laod.» *Nature*: vol. 424, 10 July 2003.

Grätzel, Michael. «Photoelectrochemical Cells.» *Nature*: vol. 414, 15 November 2001.

Griffth, Inda G. and Gail Naughtor. «Tissue Engineering-Current Challenges and Expanding Opportunities.» *Science*: vol. 295, 8 February 2002.

Grikscheit, Tracy C. [et al.]. «Tissue - Engineered Large Intestine Resembles Native Colon with Appropriate In Vitro Physiology and Architecture.» *Annals of Surgery*: vol. 238, no. 1, July 2003.

Halim, Mounir [et al.]. «Conjugated Dendrimers for Light-Emitting Diodes: Effect of Generation.» *Advanced Materials*: vol. 11, no. 5, 1999.

Han, Mingyong [et al.]. «Quantum Dot-Tagged Microbeads for Multiplexed Optical Coding of Biomolecules.» *Nature Biotechnology*: vol. 19, July 2001.

Heath, James R. [et al.]. «A Defect - Tolerant Computer Architecture: Opportunities for Nanotechnology.» *Science*: vol. 280, 12 June 1998.

——— and Mark A. Ratner. «Molecular Electronics.» *Physics Today*: May 2003.

———, Michael E. Phelps and Leroy Hood. «Nano Systems Biology.» *Molecular Imaging and Biology*: vol. 5, no. 5, 2003.

Heeger, Alan J. «Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials.» *Angewandte*

Chemie International Edition: vol. 40, 2001.

Henderson, Rebecca. «Of Life Cycles Real and Imaginary: The Unexpectedly Long Old Age of Optical Lithography.» *Research Policy*: vol. 24, 1995.

Hernandex, Jose V., Euan R. Kay and David A. Leigh. «A Reversible Synthetic Rotary Molecular Motor.» *Science*: vol. 306, 26 November 2004.

Hua, Wei Johnson Chung and Jeff Gelles. «Distinguishing Inchworm and Hand - Over- Hand Processive Kinesin Movement by Neck Rotation Measurements.» *Science*: vol. 295, 1 February 2002.

Huynh, Wendy U., Janke J. Dittmer and A. Paul Alivisatos. «Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells.» *Science*: vol. 295, 29 March 2002.

Ito, Takashi and Shinji Ikazaki. «Pushing the Limits of Lithography.» *Nature*: vol. 406, 31 August 2000.

Joachim, C., J. K. Gimzewski and A. Aviram. «Electronics Uisng Hybrid - Moelcular and Mono - Molecular Devices.» *Nature*: vol. 408, 30 November 2000.

Kelly, T. Ross, Harshani de silva and Richard A. Silva. «Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System.» *Nature*: vol. 401, 9 September 1999.

Knight, Jonathan. «Tomorrow's World.» *Nature*: vol. 426, 11 December 2003.

Koumura, Nagatoshi [et al.]. «Light - Driven Monodirectional Molecular Rotor.» *Nature*: vol. 401, 9 September 1999.

Kroto, H. W. «C60 - The Third Man.» *Current Contents*: vol. 24, no. 36, 1993.

———. «C60: Buckminster- Fullerene.» *Nature*: vol. 318, 1985.

Langer, Robert. «Transdermal Drug Delivery: Past Progress, Current Status, and Future Prospects.» *Advanced Drug Delivery Reviews*: vol. 56, 2004.

——— and David A. Tirrell. «Designing Materials for Biology and Medicine.» *Nature*: vol. 428, 1 April 2004.

Lavik, E. and R. Langer. «Tissue Engineering: Current State and Perspectives.» *Applied Microbiology and Biotechnology*: vol. 65, 2004.

Levina, Larissa [et al.]. «Efficient Infrared Emitting PbS Quantum Dots Grown on DNA and Stable in Aqueous and Blood

Plasma.» *Advanced Materials*: 2005.
Lloyd, Seth. «Utimate Physical Limits to Computation.» *Nature*: vol. 406, 31 August 2000.
Lundstrom, Mark. «Moore's Law Forever?» *Science*: vol. 299, 10 January 2003.
Maemura, Tomoyuki [et al.]. «Initial Assessment of a Tissue Engineering Stomach Derived from Syngeneic Donors in a Rat Model.» *ASAOI Journal*: 2004.
———. «A Tissue-Engineered Stomach as a Replacement of the Native Stomach.» *Transplantation*: vol. 76, no. 1, 15 July 2003.
Manna, Liberato [et al.]. «Controlled Growth of Tetraped-Branched Inorganic Nanocrystals.» *Nature Materials*: vol. 2, June 2003.
Mao, Chuanbin [et al.]. «Virus - Based Toolkit for the Director Synthesis of Magentic and Semiconducting Nanowires.» *Science*: vol. 303, 9 January 2004.
McDonald, S. A. [et al.]. «Solution - Processed PbS Quantum Dot Infrared Photodetectors and Photovoltaics.» *Nature Materials*: vol. 4, 9 January 2005.
Milliron, Delia J. [et al.]. «Colloidal Nanocrystal Heterostructures with Linear and Branched Topology.» *Nature*: vol. 430, 8 July 2004.
Mitra, Partha P. and Jason B. Stark. «Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fibre Communication.» *Nature*: vol. 411, 28 June 2001.
Moore, Gordon. «Cramming More Components onto Integrated Circuits.» *Electronics*: vol. 38, no. 8, 1965.
Moses, Marsha A., Henry Brem and Robert Langer. «Advancing the Field of Drug Delivery: Taking Aim at Cancer.» *Cancer Cells*: vol. 4, November 2003.
Murray, C. B., C. R. Kagan and M.G. Bawendi. «Synthesis and Characterization of Monodisperse Nanocrystals and Close-Packed Nanocrystal Assemblies.» *Annual Review of Materials Science*: vol. 30, 2000.
Niklashon, L. E. «Functional Arteries Grown in Vitro.» *Science*: vol. 284, 16 April 1999.
Normile, Dennis. «The End - Not Here Yet, but Coming Soon.» *Science*: vol. 293, 3 August 2001.

Obare, S. O. and G. J. Meyer. «Nano - Structured Materials for Enviromental Remediation of Organic Contaminants in Water.» *Journal of Environmental Science and Health - Part A - Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*: vol. A39, no. 10, 2004.
Ochoa, Erin R. and Joseph P. Vacanti. «An Overview of the Pathology and Approaches to Tissue Engineering.» *Annals of the New York Academy of Sciences*: [vol. 979], 2002.
Pavesi, L. [et al.]. «Optical Gain in Silicon Nanocrystals.» *Nature*: vol. 408, 23 November 2000.
Peercy, Paul S. «The Drive to Miniaturization.» *Nature*: vol. 406, 31 August 2000.
Perkel, Jeffrey M. «Investigating Molecular Motors Step by Step.» *The Scientist*: vol. 15, 2004.
Petit-Zeman, Sophie. «Regenerative Medicine.» *Nature Biotechnology*: vol. 19, no. 3, March 2001.
Qi, Minghao [et al.]. «A Three - Dimensional Optical Photonic Crystal with Designed Point Defects.» *Nature*: vol. 429, 3 June 2004.
Quake, Stephn R. and Axel Scherer. «From Micro - to Nanofabrication with Soft Materials.» *Science*: vol. 290, 24 November 2000.
Ringe, Jochen [et al.]. «Stem Cells for Regenerative Medicine: Advances in the Engineering of Tissues and Organs.» *Nature wissenchaften*: vol. 89, 2002.
Santini, J. T. (Jr.), M. J. Cima and R. Langer. «A Controlled - Release Micro-Chip.» *Nature*: vol. 397, 20 July 1999.
Sargent, Edward H. «Infrared Quantum Dots.» *Advanced Materials*: vol. 17, 8 March 2005.
Sayes, Christie M. [et al.]. «The Differential Cytotoxicity of Water - Soluble Fullerenes.» *Nano Letters*: vol. 4, no. 10, 2004.
Schliwa, Manfred and Gunther Woehlke. «Molecular Motors.» *Nature*: vol. 422, 17 April 2003.
Schultz, Max. «The End of the Road for Silicon?» *Nature*: vol. 399, 24 June 1999. Schrope, Mark. «Which Way to Energy Utopia?» *Nature*: vol. 414, 13 December 2001.
Seemen, Nadrian C. «DNA in a Material World.» *Nature*: vol. 421, 23 January 2003.
——— and Angela M. Becher. «Emulating Biology: Building

Nanostructures from the Bottom up.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*: vol. 99, suppl. 2, 30 April 2002.

Service, Robert F. «Molecular Electronics; Next - generation Technology Hits an Early Midlife Crisis.» *Science*: vol. 302, 24 October 2003.

———. «Nanotechnology Grows Up.» *Science*: vol. 304, 18 June 2004.

Sherman, John D. «Synthetic Zeolites and Other Microsporous Oxide Molecular Sieves.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*: vol. 96, 1999.

Sherman, William B. and Nadrian C. Seeman. «A Precisely Controlled DNA Biped Walking Device.» *Nano Letters*: vol. 4, no. 7, 2004.

Sirringhaus, H. [et al.]. «High- Resolution Inkjet Printing of All - Polymer Transistor Circuits.» *Science*: vol. 290, 15 December 2000.

Smith, Bettye L. [et al.]. «Molecular Mechanistic Orgin of the Toughness of Natural Adhesives, Fibres and Composites.» *Nature*: vol. 399, 24 June 1999.

Solomon, G. S. M. Pelton and Y. Yamamoto. «Modification of Spontaneous Emission of a Single Quantum Dot.» *Physica Status Solidi*: vol. 178, 2000.

Steele, Brian C. H. and Angelika Heinzel. «Materials for Fuel-Cell Technologies.» *Nature*: vol. 414, 15 November 2001.

Steckel, J. S. [et al.]. «1.3 mu to 1.55 mu Tunable Electroluminescence from PbSe Quantum Dots Embedded within an Organic Device.» *Advanced Materials*: vol. 15, no. 21, 2003.

Stock, U. A. and J. P. Vacanti. «Tissue Engineering: Current State and Prospects.» *Annual Review of Medicine*: [vol. 52], 2001.

Tessler, Nir [et al.]. «Efficient Near - Infrared Polymer Nanocrystal Light - Emitting Diodes.» *Sciences*: vol. 295, 22 February 2002.

Thorsen, Todd, Sebastian J. Maerkl and Stephen R. Quake. «Microfuidic Large - Scale Integration.» *Science*: vol. 298, 18 October 2002.

Vogel, Viola and Gretchen Baneyx. «The Tissue Engineering Puzzle: A Molecular Perspective.» *Annual Review of Biomedical Engineering*: vol. 5, 2003.

Warheit, D. B. [et al.]. «Comparative Pulmonary Toxicity Assessment of Single - Wall Carbon Nanotubes in Rats.» *Toxicological Sciences*: vol. 77, no. 1, 2004.

Wehrenberg, Brian L. and Philippe Guyot-Sionnest. «Electron and Hole Injection in PbSe Quantum Dot Films.» *Journal of the American Chemical Society*: vol. 125, 2003.

Whaley, Sandra R. [et al.]. «Selection of Peptides with Semiconductor Binding Specificity for Directed Nano-Crystal Assembly.» *Nature*: vol. 405, 8 June 2000.

Whitesides, George M. «The «Right» Size in Nanobiotechnology.» *Natural Biotechnology*: vol, 21, no. 10, October 2003.

——— and Bartosz Grzybowski. «Self-assembly at All Scales.» *Science*: vol. 295, 29 March 2002.

Yao, Zhen [et al.]. «Carbon Nanotube Intramolecular Junctions.» *Nature*: vol. 402, 18 November 1999.

Yildiz, Ahmet [et al.]. «Myosin V Walks Hand - Over - Hand: Single Fluorophore Imaging with 1.5 - nm Localization.» *Science*: vol. 300, 27 June 2003.

Yurke, Bernard [et al.]. «A DNA -Fuelled Molecular Machine Made of DNA.» *Nature*: vol. 406, 10 August 2000.

Zandonella, Catherine. «The Beat Goes On.» *Nature*: vol. 421, 27 February 2003.

Zhang, Peihong [et al.]. «Computational Design of Direct - Bandgap Semiconductors that Lattice - Match to Silicon.» *Nature*: vol. 409, 4 January 2001.

Zhang, Shi-Wei and Timothy M. Swager. «Fluorescent Detection of Chemical Warfare Agents: Functional Group Specific Ratiometric Chemosensors.» *Journal of the American Chemical Society*: vol. 125, 2003.

Ziemelis, Karl *«Putting It on Plastics.» Nature*: vol. 393, 18 June 1998.

Sites

http://www.aulis.com
http://www.biomedcentral.com
http://www.clavius.org
http://es.epa.gov
http://www.fda.gov
http://nobelprize.org

الفهرس

ـ ت ـ

ـ ث ـ

ـ ج ـ

ـ د ـ

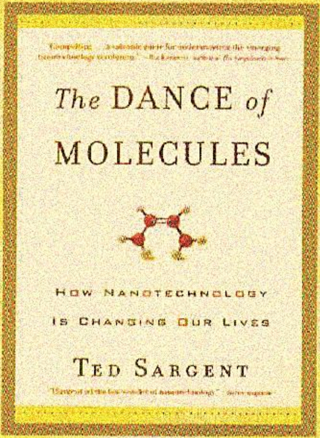
ـ ر ـ

ـ س ـ

ـ ش ـ

رقص الجزيئات

كيف تغير التكنولوجيا النانوية من حياتنا



- أصول المعرفة العلمية
- ثقافة علمية معاصرة
- فلسفة
- علوم إنسانية واجتماعية
- تقنيات وعلوم تطبيقية
- آداب وفنون
- لسانيات ومعاجم

المنظمة العربية للترجمة

TARANA

يركّز تِدْ سرجنت في كتابه **رقص الجزيئات** ـ وهو عملية اكتشافية تشق أرض مستقبل التكنولوجيا النانوية ـ على أنّ كل الاختصاصات العلمية ابتداءً من الطب حتى الرقاقات المايكروية ستجتمع لابتداع مواد تستخدم أصغر المقاسات الممكنة، ألا وهي الجزيئة. وبدلاً من محاولة تخطي العالم الطبيعي، فإنّ التكنولوجيا النانوية تقتبس كل حركة تؤديها، من الهيكلية المتكاملة والرائعة للطبيعة ذاتها. أما إمكانياتها الكامنة، فتبدو لا نهائية مع مترتبات عملية كفيلة بإحداث ثورة في طرائق عيشنا وعملنا. وسيقوم الرواد من العلماء من خلال التلاعب بأدق كتل البناء في الطبيعة بتحسين نوعية الحياة للجميع بطريقة شديدة الأثر.

- **تِدْ سرجنت**: عالم في جامعة تورنتو. اختير عام 2003 بين مئة من خيرة المبتكرين الشباب في العلوم من قبل Technology Review. وقد نشرت مجلات *Wired* و*Business Week* و*National Geographic* تقارير عن المنجزات العلمية التي حققها.

- **صباح صدّيق الدملوجي**: مهندس ميكانيك عمل في الصناعة النفطية ومن ثم في توفير الإسناد الهندسي للبحوث العلمية.

ISBN 978-9953-0-1364-0
9 789953 013640

الثمن: 10 دولارات
أو ما يعادلها